



PLANTA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO POR REFORMADO DE GAS NATURAL



Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

Universidade de Santiago de Compostela

Escola Técnica Superior de Enxeñaría

Julio 2016

Alejandro Ferraces Azcunaga | Óscar López Gestoso

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO I: MEMORIA

Anexo I: Balances de materia

Anexo II: Balances de energía

Anexo III: Cálculos justificativos

Anexo IV: Viabilidad económica

Anexo V: Fichas de seguridad

DOCUMENTO II: PLANOS

Plano 1: Emplazamiento

Plano 2: PFD

Plano 3: P&ID

DOCUMENTO III: ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA

Estudio de seguridad y salud

Estudio de impacto ambiental

DOCUMENTO IV: PLIEGO DE CONDICIONES

DOCUMENTO V: PRESUPUESTO

Planta de Producción de Hidrógeno por
Reformado de Gas Natural

DOCUMENTO I.

MEMORIA

Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

Universidade de Santiago de Compostela

Escola Técnica Superior de Enxeñaría

Julio 2016

Alejandro Ferraces Azcunaga | Óscar López Gestoso

INDICE

1. OBJETO DEL TRABAJO	13
2. INTRODUCCIÓN	14
2.1 Propiedades físicas del hidrógeno	14
2.1.1 Orto-hidrógeno (o-H ₂) y para-hidrógeno (p-H ₂)	14
2.1.2 Propiedades termodinámicas características	15
2.2 Propiedades químicas	17
2.2.1 Reactividad	17
2.2.2 El puente de hidrógeno	18
2.2.3 Ignición y detonación.....	19
2.3 Aplicaciones del hidrógeno en la industria	20
2.3.1 Síntesis de amoníaco.....	20
2.3.2 Procesos de refinería.....	20
2.3.3 Síntesis de metanol	21
2.3.4 Tratamiento de carbón	22
2.3.5 Procesos Fischer-Tropsch.....	22
2.3.6 Síntesis orgánica	22
2.3.7 Síntesis inorgánica	23
2.3.8 Industria metalúrgica	23
2.3.9 Otros usos	23
2.4 Alternativa energética de futuro.....	24
2.5 Visión general de la Economía del Hidrógeno.....	26
2.6 Pilas de combustible.....	27
2.7 Almacenamiento	30

2.7.1	Almacenamiento en forma gaseosa	30
2.7.2	Almacenamiento en forma líquida.....	31
2.7.3	Combinación química con hidruros metálicos.....	31
2.7.4	Adsorción en sólidos porosos	32
2.8	Transporte	33
2.8.1	Transporte como gas comprimido	34
2.8.1.1	Gasoductos	34
2.8.1.2	Por carretera	36
2.8.2	Transporte como hidrógeno líquido.....	36
2.8.2.1	Por carretera y ferrocarril	36
2.8.2.2	Por mar	37
2.8.2.3	Tuberías	37
2.8.3	Transporte en hidruros metálicos.....	37
2.9	El gas natural.....	37
2.10	El vapor de agua.....	40
2.11	El dióxido de carbono	40
2.11.1	Almacenamiento y captura de CO ₂	40
2.11.2	Aplicaciones del CO ₂ en la industria química y de procesos.....	42
3.	MERCADO.....	43
4.	PROCESOS, TECNOLOGÍAS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	44
4.1	Procesos de producción.....	44
4.1.1	Producción a partir de recursos fósiles	44
4.1.1.1	Hidrógeno a partir de gas natural	45
4.1.1.2	Hidrógeno a partir de carbón	46
4.1.2	Producción a partir de recursos renovables	47

4.1.2.1	Hidrógeno a partir de agua	47
4.1.2.2	Hidrógeno a partir de biomasa	51
4.1.3	Selección de una alternativa	54
4.2	Tecnologías alternativas.....	57
4.2.1	Reformador	57
4.2.1.1	Reformadores cilíndricos.....	57
4.2.1.2	Reformadores rectangulares	58
4.2.1.3	Diseños especiales	60
4.2.1.4	Selección del tipo de reformador.....	62
4.2.2	Columnas de absorción.....	62
4.2.2.1	Selección de la tecnología de separación	62
4.2.2.2	Tipos y selección de la amina de operación	65
4.2.2.3	Selección del tipo de columna.....	66
5.	EMPLAZAMIENTO	67
5.1	Criterios de selección	67
5.2	Emplazamiento seleccionado	68
6.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	73
6.1	Sección 100, pretratamiento de la alimentación.....	74
6.2	Sección 200, sección de reacción química	75
6.3	Sección 300, sección de separación y purificación	77
6.4	Servicios auxiliares	80
7.	DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.....	82
7.1	Listado de equipos.....	82
7.2	Compresores.....	84
7.2.1	Selección del tipo de compresor	84
7.2.2	Compresor K-201	85

7.2.3	Compresor K-202	85
7.2.4	Compresor K-301	86
7.3	Bombas.....	86
7.3.1	Bomba P-101 A/B.....	87
7.3.2	Bomba P-301 A/B.....	87
7.4	Intercambiadores de calor	88
7.4.1	Intercambiador de calor E-101	88
7.4.2	Intercambiador de calor E-102	89
7.4.3	Intercambiador de calor E-103	89
7.4.4	Intercambiador de calor E-104	90
7.4.5	Intercambiador de calor E-201	91
7.4.6	Intercambiador de calor E-202	91
7.4.7	Intercambiador de calor E-203	92
7.4.8	Intercambiador de calor E-301	92
7.4.9	Intercambiador de calor E-302	93
7.4.10	Intercambiador de calor E-303 A/B.....	94
7.4.11	Intercambiador de calor E-304	94
7.4.12	Intercambiador de calor E-305	95
7.4.13	Intercambiador de calor E-306	96
7.5	Reactores.....	96
7.5.1	Reformador R-201	96
7.5.1.1	Esquema de reacción.....	97
7.5.1.2	Catalizador.....	99
7.5.1.3	Descripción del equipo	100
7.5.1.4	Características del reformador R-201	105

7.5.2	Reactores R-202 y R-203: HTS y LTS	105
7.5.2.1	Esquema de reacción	106
7.5.2.2	Catalizador.....	107
7.5.2.3	Descripción de los equipos	108
7.6	Columnas de absorción y desorción.....	111
7.6.1	Columnas de relleno	111
7.6.2	Componentes internos de las columnas de relleno	112
7.6.2.1	Soporte del relleno.....	112
7.6.2.2	Distribuidores de líquido	113
7.6.2.3	Redistribuidores del líquido	115
7.6.2.4	Platos de contención	115
7.6.3	Absorbedor C-301.....	116
7.7	Sistema PSA.....	117
7.7.1	Principio de funcionamiento	120
7.7.2	Descripción del ciclo de operación	121
7.7.3	Selección del adsorbente.....	124
7.7.4	Requerimientos y condiciones de operación.....	126
7.7.5	Descripción de los equipos	127
8.	CONTROL E INSTRUMENTACIÓN	128
8.1	Introducción	128
8.2	Elementos constituyentes de un control automático	129
8.2.1	Sensor	129
8.2.2	Transmisor	129
8.2.3	Controlador	129
8.2.4	Actuador	130

8.2.5	PLC	130
8.3	Elementos de seguridad.....	130
8.3.1	Sistema de alarmas.....	130
8.3.2	Dispositivos mecánicos de alivio de presión	131
8.4	Nomenclatura	133
8.5	Estrategias de control	136
8.5.1	Control <i>feedback</i> sencillo.....	136
8.5.2	Control ratio.....	137
8.6	Controladores: algoritmo PID	138
8.7	Descripción del sistema de control de la planta	139
8.7.1	Control de presión de la columna de absorción C-101: Lazo 110	139
8.7.2	Control de nivel de la columna de absorción C-101: Lazo 120.....	140
8.7.3	Control de presión de la columna de desorción C-102: Lazo 130	140
8.7.4	Control de nivel del separador de condensados S-101: Lazo 140	140
8.7.5	Control de temperatura de la parte inferior de la columna de desorción C-102: Lazo 150	141
8.7.6	Control de nivel de la columna de desorción C-102: Lazo 160.....	142
8.7.7	Control de nivel del <i>reboiler</i> E-102: Lazo 170.....	142
8.7.8	Control de flujo de la bomba P-101 A/B: Lazo 180	142
8.7.9	Control de temperatura del intercambiador E-103: Lazo 190.....	143
8.7.10	Control de flujo de la recirculación de gas: Lazo 210	143
8.7.11	Control de presión de descarga del compresor K-201: Lazo 220	144
8.7.12	Control de flujo mínimo del compresor K-201: Lazo 230.....	144
8.7.13	Control de flujo del vapor de agua introducido junto con la alimentación del reactor R-201: Lazo 240	145

8.7.14	Control del reactor R-201 (reformador).....	147
8.7.15	Control de presión en la cámara de combustión del reformador R-201: Lazo 250	147
8.7.16	Control de temperatura del intercambiador E-202: Lazo 260.....	148
8.7.17	Control del reactor R-202 (HTS)	148
8.7.18	Control de temperatura del intercambiador E-203: Lazo 270.....	149
8.7.19	Control del reactor R-203 (LTS)	149
8.7.20	Control de presión de descarga del compresor K-202: Lazo 280	149
8.7.21	Control de flujo mínimo del compresor K-202: Lazo 290.....	150
8.7.22	Control de temperatura del intercambiador E-301: Lazo 310.....	150
8.7.23	Control de presión del separador de condensados S-301: Lazo 320.....	151
8.7.24	Control de nivel del separador de condensados S-301: Lazo 330	151
8.7.25	Control de presión de descarga del compresor K-301: Lazo 340	151
8.7.26	Control de flujo mínimo del compresor K-301: Lazo 350.....	152
8.7.27	Control de temperatura del intercambiador E-302: Lazo 360.....	152
8.7.28	Control de presión de la columna de absorción C-301: Lazo 370	153
8.7.29	Control de nivel de la columna de absorción C-301: Lazo 380.....	153
8.7.30	Control de presión de la columna de desorción C-302: Lazo 390	154
8.7.31	Control de nivel del separador de condensados S-302: Lazo 3100	154
8.7.32	Control de temperatura de la parte inferior de la columna de desorción C- 302: Lazo 3110	154
8.7.33	Control de nivel de la columna de desorción C-302: Lazo 3120.....	155
8.7.34	Control de nivel del <i>reboiler</i> E-304: Lazo 3130.....	155
8.7.35	Control de flujo de la bomba P-301 A/B: Lazo 3140	156
8.7.36	Control de temperatura del intercambiador E-305: Lazo 3150.....	156

8.7.37 Control de PSA: Lazo 3160.....	157
8.8 Sistemas de alivio y alarmas	157
8.9 Otros indicadores	159
9. SEGURIDAD Y SALUD	160
9.1 Sustancias peligrosas.....	160
9.2 Estudio básico de reactividad.....	161
9.2.1 Hidrógeno y monóxido de carbono.....	163
9.2.2 Oxígeno y monóxido de carbono.....	164
9.2.3 Oxígeno e hidrógeno.....	164
9.2.4 Oxígeno y metano.....	164
9.2.5 Agua y monóxido de carbono	164
9.3 Aplicación de Seveso III	165
9.4 Distancias de seguridad.....	166
9.5 Identificación simple de escenarios de incidentes.....	168
9.6 Índice DOW de incendio y explosión	172
10.NORMATIVA DE APLICACIÓN.....	177
10.1 Normativa de aplicación referente a la construcción de la instalación	177
10.1.1 Legislación europea	177
10.1.2 Legislación nacional	178
10.2 Normativa de aplicación referente a seguridad y salud.....	178
10.2.1 Legislación europea	178
10.2.2 Legislación nacional	179
10.3 Normativa de aplicación referente a medio ambiente.	181
10.3.1 Legislación europea	181

10.3.2	Legislación nacional	181
10.3.3	Legislación autonómica	182
10.4	Normas técnicas y códigos de diseño.....	182
10.4.1	Referentes a bombas y compresores	182
10.4.2	Referentes a intercambiadores de calor	183
10.4.3	Referente a depósitos	183
10.4.4	Otros	183
11.	BIBLIOGRAFÍA	184

1. OBJETO DEL TRABAJO

El presente Trabajo de Final de Grado tiene como objeto el diseño de una *Planta de producción de hidrógeno por reformado de gas natural* con vapor de agua. Se efectuarán el diseño de dos de las unidades principales del proceso: el reactor y la columna de absorción con reacción química. La capacidad de producción de la planta es de 38000 Nm³/h (28900 t/año) de hidrógeno, con una pureza del 99,9%, una capacidad típica para este tipo de procesos.

El peticionario de este trabajo, es la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, mediante el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Santiago de Compostela. Éste constituye el Trabajo Final de Grado por el cual Don Alejandro Ferraces Azcunaga y Don Óscar López Gestoso optan al título de Graduado en Ingeniería Química por la Universidad de Santiago de Compostela.

Don Óscar López Gestoso realiza el diseño del reformador R-201 y Don Alejandro Ferraces Azcunaga el de la columna de absorción con reacción química C-301. El resto del contenido del presente trabajo se realiza de modo conjunto.

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Propiedades físicas del hidrógeno

El hidrógeno, con número atómico 1, es el primer elemento de la tabla periódica y el más ligero, con la configuración electrónica $1s^1$. Es un gas incoloro, inodoro y no venenoso. A 0 °C y 100 kPa, 1 L de H_2 tiene una masa de 0,0898 g. [1, 2]

Posee tres isótopos, hidrógeno, deuterio y tritio. Las diferencias relativas entre las masas de los isótopos son grandes, por lo que las propiedades físicas y cinéticas cambian considerablemente, sin embargo, aunque el deuterio y el tritio pueden encontrarse de forma natural, aparecen en proporciones muy bajas en la naturaleza:

- Hidrógeno, H_1^1 (99,985%)
- Deuterio, H_1^2 (0,015%)
- Tritio, H_1^3 ($< 10^{-12}$ %)

2.1.1 Orto-hidrógeno (o- H_2) y para-hidrógeno (p- H_2)

El núcleo de los átomos de hidrógeno y sus isótopos poseen un *spin* nuclear determinado. De este modo, en las moléculas diatómicas, los núcleos pueden girar en el mismo sentido o en sentidos opuestos, es decir, paralelos o antiparalelos. De este modo, las moléculas de H_2 , D_2 y T_2 pueden existir en forma de dos isómeros con diferente *spin* nuclear, conocidos como forma orto (sentido paralelo) y forma para (sentido antiparalelo). Ambas formas se encuentran en equilibrio. Este fenómeno se encuentra en todas las moléculas homonucleares diatómicas, pero en el caso del hidrógeno los efectos en las propiedades del producto son más significativas.

Por lo tanto se encuentra comúnmente la forma n- H_2 (hidrógeno normal), que consiste en la mezcla en equilibrio a temperatura ambiente de los diferentes isómeros e isótopos. A temperatura ambiente esta mezcla es aproximadamente de 3:1 entre orto-hidrógeno y para-hidrógeno. El para-hidrógeno es la forma de H_2 con una energía más baja, de forma que la mezcla en equilibrio a muy bajas temperaturas es casi para-hidrógeno puro, produciéndose la conversión de o- H_2 a p- H_2 . [1-3]

2.1.2 Propiedades termodinámicas características

Las principales propiedades se suelen dar para el n-H₂ y el p-H₂, y estas se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Selección de diferentes propiedades físicas y termodinámicas para el p-H₂ y el n-H₂ en diferentes condiciones. Fuente: [1]

	p-H ₂	n-H ₂
Punto triple:		
Temperatura (K)	13,803	13,957
Presión (kPa)	7,04	7,2
Densidad (sólido) (kg/m ³)	86,48	86,71
Densidad (líquido) (kg/m ³)	77,03	77,21
Densidad (gas) (kg/m ³)	0,126	0,130
Calor de vaporización (J/mol)	898,30	899,10
Calor de fusión (J/mol)	117,5	
Calor de sublimación (J/mol)	1022,9	
Fase sólida:		
Densidad (kg/m ³)	86,50	
C _p (J/mol·K)	5,73	
Conductividad térmica (W/m·K)	0,9	
Fase líquida:		
Densidad (kg/m ³)	70,78	70,96
C _p (J/mol·K)	19,70	19,70
C _v (J/mol·K)	11,60	11,60
Viscosidad (mPa·s)	13,1·10 ⁻³	13,3·10 ⁻³
Velocidad del sonido (m/s)	1089	1101
Conductividad térmica (W/m·K)	98,92·10 ⁻³	100,00·10 ⁻³
Fase gas:		
Densidad (kg/m ³)	1,338	1,331
C _p (J/mol·K)	24,49	24,60
C _v (J/mol·K)	13,10	13,20
Viscosidad (mPa·s)	1,13·10 ⁻³	1,11·10 ⁻³
Velocidad del sonido (m/s)	355	357
Conductividad térmica (W/m·K)	16,94·10 ⁻³	16,50·10 ⁻³
Factor de compresibilidad	0,906	0,906

Tabla 1 (Continuación). Selección de diferentes propiedades físicas y termodinámicas para el p-H₂ y el n-H₂ en diferentes condiciones. Fuente: [1]

	p-H ₂	n-H ₂
Punto crítico:		
Temperatura (K)	32,976	33,190
Presión (kPa)	1,290	1,325
Densidad (kg/m ³)	31,43	30,12
Punto de ebullición (a 101,3 kPa) (K)	20,268	20,390
Propiedades a 273,15 K y 101,3 kPa:		
Densidad (kg/m ³)	0,0899	0,0899
C _p (J/mol·K)	30,35	28,59
Viscosidad (mPa·s)	8,34·10 ⁻³	8,34·10 ⁻³
Velocidad del sonido (m/s)	1246	1246
Conductividad térmica (W/m·K)	182,6·10 ⁻³	173,9·10 ⁻³
Factor de compresibilidad	1,00050	1,00042
Número de Prandtl	0,6873	0,6800

El hidrógeno difunde rápidamente a través de muchos materiales, debido en parte a su muy pequeño radio atómico. Esto sucede especialmente en aquellos metales que no tienen sus niveles electrónicos internos ocupados completamente, de forma que el hidrógeno se “disolvería” en estos metales, no en la forma molecular, pero si en la forma atómica. De este modo, por ejemplo, el paladio y las aleaciones de paladio y plata (con un contenido en plata de menos del 40% en peso) proporcionan una particularmente alta solubilidad para el hidrógeno. Esta característica sirve para separar el hidrógeno de otros gases y purificarlo a escala industrial. Del mismo modo, de la difusión de hidrógeno a través de los metales se sirven técnicas analíticas como la determinación de hidrógeno por cromatografía gaseosa. Además, esta propiedad se ha vuelto de vital importancia para algunos sistemas de almacenamiento de hidrógeno. [1, 2]

Del mismo modo, el hidrógeno es el elemento con la capacidad de difusión más alta en líquidos y gases. Esto supone un punto positivo en lo relativo a aspectos de seguridad industrial, dado que ante una fuga de hidrógeno, la nube que se crearía se difundiría rápidamente en la atmósfera. No obstante, este punto positivo en cuanto a los riesgos inherentes al producto, se ve altamente superado por aspectos negativos como su carácter altamente inflamable y potencialmente explosivo en contacto con el oxígeno atmosférico. Por ello se deben adoptar normativas de seguridad específicas que son diferentes a las que hoy se aplican con éxito para otros compuestos como la gasolina o el butano.

En cuanto al hidrógeno líquido, es incoloro, y con baja viscosidad y tensión superficial.

El hidrógeno en estado sólido es también incoloro y bajo presiones extremadamente altas se ha conseguido obtener una fase de hidrógeno metálico eléctricamente conductor y con una densidad de más de 1000 kg/m³. [1]

2.2 Propiedades químicas

El primer nivel electrónico puede contener un máximo de dos electrones, por lo tanto, la química del hidrógeno dependerá fundamentalmente de tres procesos:

- Pérdida de un electrón, resultando en el ión H⁺.
- Ganancia de un electrón, resultando en el anión H⁻.
- Formación de un enlace entre dos electrones.

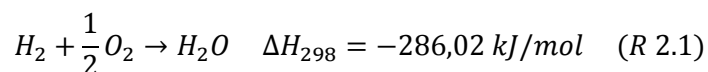
El carácter covalente o iónico de los enlaces creados depende de la electronegatividad del otro elemento con el que se une el hidrógeno.

La electronegatividad del hidrógeno es de 2.1, y oxidará a los elementos menos electronegativos (metales alcalinos y alcalinotérreos, por ejemplo), y reducirá a los elementos más electronegativos (halógenos, oxígeno, nitrógeno y carbono, por ejemplo).

La fuerza del enlace H – X en los hidruros covalentes depende de la electronegatividad y del tamaño del otro átomo al que se une el hidrógeno. De este modo la fuerza del enlace decrece dentro de cada grupo al aumentar el número atómico y decreciendo de forma general a lo largo de cada periodo. El enlace covalente más estable es aquel formado entre dos átomos de hidrógeno (o isótopos), o con halógenos, oxígeno, carbono y nitrógeno. [1]

2.2.1 Reactividad

- Los halógenos reaccionan con el hidrógeno para dar haluros de hidrógeno (cloruro de hidrógeno, bromuro de hidrógeno, etc.) aumentando la reactividad al disminuir el radio atómico del halógeno.
- El oxígeno reacciona con el hidrógeno según la reacción R 2.1.



Por encima de los 550 °C la reacción se lleva a cabo con propagación de la llama, explosión o detonación.

- A elevadas temperaturas y en presencia de los catalizadores adecuados el hidrógeno puede reaccionar con el nitrógeno para producir amoníaco. Como se verá en el apartado correspondiente a las aplicaciones actuales del hidrógeno en la industria, es una de las reacciones más importantes a este nivel.
- El hidrógeno reacciona con el carbono a altas temperaturas para producir metano. Los óxidos de carbono pueden también reaccionar con el hidrógeno en presencia de los catalizadores adecuados dando una gran variedad de productos en función de las condiciones en las que se lleve a cabo la reacción (reacciones Fischer-Tropsch). Dentro de la química del carbono, el hidrógeno también reacciona con hidrocarburos insaturados para convertirlos en saturados o parcialmente saturados.
- Un gran número de metales reacciona con hidrógeno para dar lugar a diferentes hidruros. Dependiendo de la naturaleza del enlace atómico, los hidruros pueden ser iónicos, covalentes o metálicos.

Los primeros se forman con los metales más electropositivos, los metales alcalinos y los metales alcalinotérreos (calcio, estroncio y bario), al reaccionar con el hidrógeno a altas temperaturas. Son cristalinos, tienen altos calores de formación y puntos de fusión elevados. Son reactivos y agentes reductores fuertes, todos ellos reaccionan con el agua para liberar hidrógeno.

Los hidruros covalentes pueden ser tanto sólidos, como líquidos o gaseosos. Los más comunes son los hidruros de boro, aluminio, silicio, germanio y estaño. Por otra parte, los hidruros de magnesio y berilio representan la transición entre los hidruros iónicos y los covalentes.

Los hidruros metálicos se forman con los metales de transición, al “disolverse” el hidrógeno debido a su alta difusividad, como se ha visto en las propiedades físicas. Son igualmente procesos con una estequiometría definida, resultando en compuestos tales como: ZrH_2 , PdH , VH o VH_2 . [1]

2.2.2 El puente de hidrógeno

Es un tipo de enlace secundario, más débil que los enlaces típicos (iónico, covalente y metálico), que tienen lugar cuando algún átomo de hidrógeno se encuentra unido a uno de los átomos más electronegativos, entre el propio átomo de hidrógeno y otro átomo electronegativo diferente, aunque siga fuertemente unido al átomo electronegativo inicial. Esto deriva en la asociación de una serie de moléculas, lo que hace cambiar de forma importante las propiedades de estos compuestos. De este modo, compuestos como el NH_3 , el H_2O y el HF , tienen puntos y

calores de ebullición mucho más elevados que moléculas análogas como la PH_3 , el H_2S o el HCl . [1]

2.2.3 Ignición y detonación

Proporcionando la suficiente energía de activación, el hidrógeno reacciona de forma más o menos violenta con agentes oxidantes como el oxígeno del aire, flúor o cloro. Dependiendo de las condiciones podrán ocurrir combustiones, deflagraciones o detonaciones.

Las propiedades de ignición y detonación son particularmente importantes en materia de seguridad. Los límites de inflamabilidad son extraordinariamente altos en el caso del hidrógeno. En la Tabla 2 se recogen estos valores y se comparan con los de otras sustancias inflamables como el metano, el propano y la gasolina. [1]

Tabla 2. Propiedades de combustión y explosión de hidrógeno, metano, propano y gasolina, en condiciones estándar. Fuente [1]

	Hidrógeno	Metano	Propano	Gasolina
Densidad (kg/m^3)	0,084	0,65	2,42	4,4 ^a
Coeficiente de difusión en aire (cm^2/s)	0,61	0,16	0,12	0,05
Límites de inflamabilidad en aire (% vol.)	4,0-75	5,3-15	2,1-9.5	1-7,6
Composición estequiométrica en aire (% vol.)	29,53	9,48	4,03	1,76
Energía mínima de ignición en aire (mJ)	0,02	0,29	0,26	0,24
Temperatura de autoignición (K)	858	813	760	500-744
Velocidad máxima de llama en aire (m/s)	3,46	0,45	0,47	1,76
Velocidad de detonación en aire (km/s)	1,48-2,15	1,4-1,64	1,85	1,4-1,7 ^b
Energía de explosión (g TNT equivalente/g)	24	11	10	10
Energía de explosión (g TNT equivalente/ m^3)	2,02	7,03	20,5	44,2

^a 100kPa y 15,5°C. ^b Basado en las propiedades de pentano y benceno.

En el caso concreto de la mezcla de hidrógeno con oxígeno puro, es prácticamente inflamable a cualquier proporción, siendo los límites de inflamabilidad para el hidrógeno en este caso de 4,65-93,9%. [1]

Estos y otros riesgos propios del hidrógeno serán tenidos en cuenta en el apartado 9 del presente Documento I, relativo a aspectos y análisis de seguridad y salud propios de la planta.

2.3 Aplicaciones del hidrógeno en la industria

El hidrógeno es un compuesto de gran interés para la industria química, participando en reacciones de adición en procesos de hidrogenación o como agente reductor. En la Figura 1 se recogen muchos de estos procesos, la mayoría de los cuales se tratarán a continuación. [1, 4]

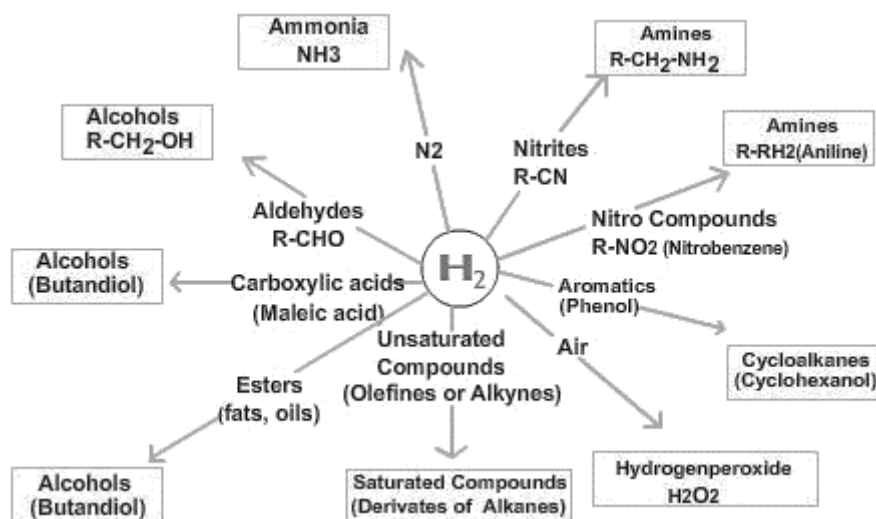
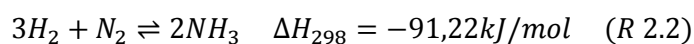


Figura 1. Algunos de los procesos industriales en los que participa el hidrógeno. Fuente: [5]

2.3.1 Síntesis de amoníaco

El amoníaco se obtiene por la reacción catalítica exotérmica entre el nitrógeno y el hidrógeno (R 2.2).



Industrialmente, por cada tonelada de amoníaco se necesitan 1965 m^3 de hidrógeno y 668 m^3 de nitrógeno (ambos en condiciones estándar de presión y temperatura). En torno al 57,5% del H_2 producido en el mundo se emplea en esta síntesis. [1, 4]

2.3.2 Procesos de refinoría

Los procesos de hidrogenación en refinoría tienen como objetivo principal la obtención de fracciones ligeras de crudo a partir de fracciones pesadas, aumentando su contenido en hidrógeno y disminuyendo su peso molecular. De forma simultánea pueden eliminarse elementos indeseados como azufre, nitrógeno y metales. Entre estos procesos se encuentran la

hidrodesulfuración, la hidroisomerización, o el hidrocracking. El hidrógeno empleado en este tipo de procesos representa el 27,4% del producido en el mundo. [1, 4]

En la Figura 2 se puede ver como el hidrógeno está totalmente integrado en los procesos de refinería.

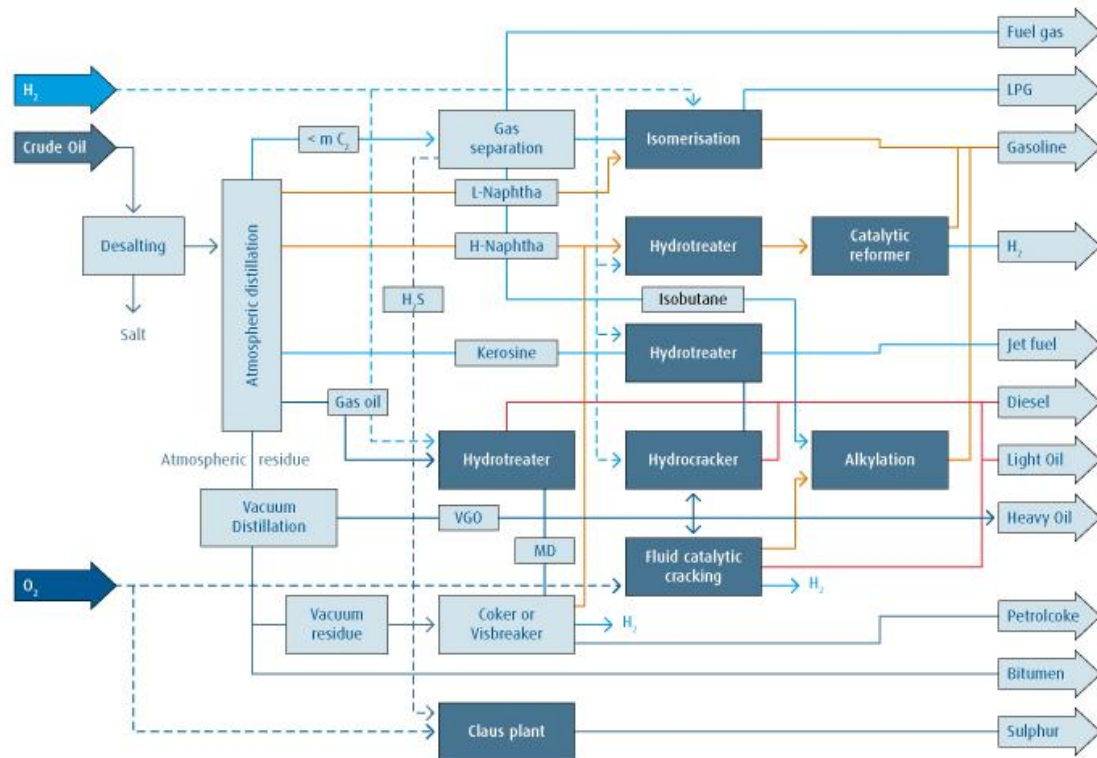
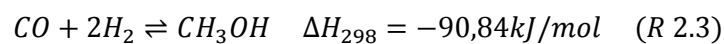


Figura 2. Aplicación del hidrógeno en los procesos de refinería. Fuente: [6]

2.3.3 Síntesis de metanol

El metanol puede ser producido a partir de mezclas de hidrógeno y óxidos de carbono por medio de una reacción catalítica. Las reacciones R 2.3 y R 2.4 son las propias de este proceso. [1]



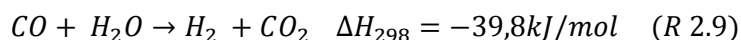
El 9,7% del hidrógeno producido se consume en la síntesis de metanol.

2.3.4 Tratamiento de carbón

Mediante el tratamiento del carbón en presencia de hidrógeno, en diferentes condiciones de presión y temperatura, pueden obtenerse productos líquidos y/o gaseosos mediante diferentes procesos tales como: hidrogenación, hidropirólisis o gasificación hidrogenante. [1]

2.3.5 Procesos Fischer-Tropsch

El hidrógeno y el monóxido de carbono reaccionan para producir hidrocarburos de acuerdo con las reacciones R 2.5, R 2.6, R 2.7 y R 2.8, con la reacción R 2.9 como principal reacción secundaria.



No obstante aparecen también otras reacciones secundarias como la formación de alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres y otros compuestos orgánicos que pueden suponer un problema para este tipo de procesos. [1]

2.3.6 Síntesis orgánica

En química orgánica el hidrógeno participa en un gran número de procesos de hidrogenación o reducción para la obtención de productos químicos y productos intermedios. Entre estos procesos se encuentran: la hidrogenación de hidrocarburos insaturados y aromáticos, hidrogenación de grasas, formación de alcoholes y aminas, hidrogenación de aldehídos y cetonas, hidrogenación de compuestos orgánicos nitrogenados (para la producción de anilina, por ejemplo), etc. [1, 7]

2.3.7 Síntesis inorgánica

El hidrógeno es imprescindible en procesos de importancia comercial como por ejemplo la producción de ácido clorhídrico, peróxido de hidrógeno, hidroxilaminas, etc. [7]

2.3.8 Industria metalúrgica

En la industria siderúrgica, el mineral de hierro puede ser reducido empleando coque o un gas que contenga hidrógeno, monóxido de carbono, o mezclas de éstos. Este gas reductor puede obtenerse mediante reformado con vapor de agua o mediante oxidación parcial de combustibles fósiles.

Además en la industria metalúrgica, el hidrógeno se emplea como agente reductor y en procesos de producción de otros metales no-férricos, como cobre, níquel, cobalto, molibdeno, uranio, etc. [1, 7]

2.3.9 Otros usos

Además de los usos industriales del hidrógeno mencionados en los apartados anteriores, que son los de mayor volumen de utilización, también se utiliza como:

- Combustible aeroespacial.
- Llamas de alta temperatura: La combustión de una mezcla estequiométrica de hidrógeno y oxígeno conduce a temperaturas de llama comprendidas entre 3000 y 3500 K, las cuales pueden ser usadas para corte y soldadura en la industria del metal, crecimiento de cristales sintéticos, producción de cuarzo, etc.
- Plasma de hidrógeno.
- Tratamiento de agua: Los contenidos demasiado elevados de nitratos en aguas potables pueden ser reducidos por desnitrificación en biorreactores, en los que las bacterias emplean el hidrógeno como fuente de energía.
- Refrigerante (hidrógeno líquido): Por ejemplo para enfriar metales superconductores. [1]

Todos estos procesos y aplicaciones constituyen los principales usos del hidrógeno en la actualidad, sin embargo, en los últimos tiempos, se está empezando a visualizar una nueva

aplicación de gran interés y que podría revolucionar la forma en la que utilizamos la energía actualmente, las pilas de combustible.

2.4 Alternativa energética de futuro

La demanda energética mundial, estimada en unos 12900 millones de toneladas equivalentes de petróleo, se ve cubierta en más de un 86,3% por combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural (BP, 2015) [8]. Esta dependencia tiene importantes repercusiones. Desde un punto de vista ambiental, la combustión de combustibles fósiles constituye el principal causante de la emisión de gases de efecto invernadero, responsables del efecto invernadero global que sufre nuestro planeta. [9]

Esta situación no resulta sostenible a medio plazo y se empezó a apuntar hace unos años, desde algunas administraciones, la necesidad de preparar una transición controlada hacia una nueva forma de producción y consumo energético que sea limpio, seguro y fiable: *U.S. Department of Energy* (2004) [10], Comisión Europea (2003) [11], y esta tendencia continúa hoy en día *U.S. Department of Energy* (2015) [12], Comisión Europea (2011) [13].

Una de las respuestas que más fuerza está tomando a esta crisis que se avecina, es el uso del hidrógeno como vector energético. Esta utilidad estriba en la aparición de las pilas de combustible como sistemas de transformación de la energía almacenada en el hidrógeno en electricidad. Con el hidrógeno y las pilas de combustible se abre un nuevo futuro energético. Concretamente, dentro de la Unión Europea, el Plan de Estratégico de Tecnología Energética (*European Strategic Energy Technology*, (SET)) ha seleccionado el hidrógeno y las pilas de combustible entre las tecnologías necesarias para que Europa sea capaz de alcanzar los objetivos para el 2020 de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20%. [9, 13, 14]

Tanto en la última década del siglo pasado, como en la primera década del siglo XXI se ha impulsado la investigación de diferentes sistemas de pilas de combustible, orientadas tanto a ser acompañantes de los combustibles fósiles como a utilizarse con las energías renovables. De este modo, la filosofía de gestión de la energía en el futuro puede ser construir numerosas redes de pequeña potencia aprovechando los recursos renovables más apropiados y disponibles en cada caso. Con estos recursos se puede aprovechar directamente la energía en forma de electricidad y los excedentes se pueden transformar en hidrógeno. Con el hidrógeno almacenado se pueden abastecer los depósitos de los vehículos propios que lleven pilas de combustible o alimentar a las pilas de combustible domésticas que proporcionarán la electricidad de uso

doméstico y el calor necesario, o en su momento el frío en épocas estivales. Puede darse la circunstancia de que se produzcan excesos de energía eléctrica, en cuyo caso se podría verter a una red centralizada para abastecer a todos aquellos clientes que tuviesen en un momento dado deficiencias de suministro energético. Esta red centralizada podría estar conectada a grandes centros de producción como podrían ser las actuales centrales termoeléctricas o plantas de producción de hidrógeno a partir de fuentes fósiles. Este sistema sería el proceso de evolución desde la actual cultura de generación centralizada a una futura cultura de generación distribuida y lo que se tiene que conseguir es disponer de una red eléctrica que cada vez sea más permisiva con las conexiones de los pequeños productores.

No obstante, hay que tener en cuenta que el hidrógeno, por sí sólo, no es la solución al problema energético que se nos plantea actualmente, precisamente porque no es una fuente de energía en sí mismo, sino un portador de energía. Por lo tanto, aunque el sistema de conversión final que se desarrolle con el transcurso de las investigaciones, las pilas de combustible, fuese muy eficiente (que actualmente no lo es), es preciso considerar el ciclo de vida completo de los procesos, siendo conscientes de que los consumos energéticos tanto en la propia obtención como en el acondicionamiento para el almacenamiento y transporte pueden ser muy elevados.

Si el hidrógeno se produce de forma racional, a partir de energías renovables, combustibles fósiles (con separación del CO₂ y compuestos azufrados, como en el presente trabajo), o energía nuclear, puede constituir una buena contribución a la solución del problema energético, pero dejando claro que no sería cierto que la economía se basaría en el hidrógeno, sino que lo haría en las fuentes primarias (renovables, carbón, gas o nuclear), dando nuevamente como solución al problema energético una mezcla razonable de varias fuentes energéticas.

Con los efectos del calentamiento global mostrándose de forma cada vez más palpable en el planeta, se hace aún más evidente la necesidad de una alternativa al consumo irresponsable de combustibles fósiles y las emisiones masivas de gases de efecto invernadero. En definitiva, la implantación de la llamada Economía del Hidrógeno se perfila como una realidad ineludible en los próximos años. [14]

2.5 Visión general de la Economía del Hidrógeno

El término Economía del Hidrógeno responde a una visión de futuro donde este gas, generado de forma limpia y económica, servirá para alimentar el grueso de las necesidades energéticas de la sociedad.

Idealmente, desligando el hidrógeno de los combustibles fósiles, esta propuesta eliminaría nuestra dependencia de los mismos, ya que el hidrógeno podría ser generado a partir de fuentes renovables. Pero la implantación de este modelo ideal no es inmediata y requiere dar respuesta a importantes retos tecnológicos, económicos y sociales.

Desde el punto de vista de la producción, los procesos basados en energías renovables no se encuentran suficientemente desarrollados y a nivel industrial su coste es inasumible, por lo que sería inviable dar respuesta a la demanda energética global mediante esta vía en el medio plazo. Además, entre otros aspectos a desarrollar (seguridad, almacenamiento o transporte, que se tratarán más adelante), se haría necesario un sistema de distribución de hidrógeno similar al que existe hoy en día para la gasolina. [7, 9]

Es en este punto en dónde cobra sentido explotar la vía de la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, de forma que se pueda iniciar una transición a esta futura Economía del Hidrógeno. Actualmente, aproximadamente el 96% de la producción mundial de hidrógeno se obtiene a partir de materias primas fósiles, pero en su inmensa mayoría no se emplea para la generación de energía (sólo el 0,1% del total [4]), sino que, como se ha visto en el apartado 2.3, se emplea fundamentalmente para la síntesis del amoníaco, en procesos de refinería, para la síntesis del metanol o en la industria metalúrgica. Se trata por lo tanto de una infraestructura y de una tecnología a gran escala, que si bien no elimina inicialmente la dependencia de los combustibles fósiles, supone un punto de partida importante, ya que, además, si esta tecnología se ve acompañada por procesos de captura del CO₂ generado en el proceso, se disminuiría la contaminación atmosférica y las emisiones de gases de efecto invernadero en la misma medida en que se haría si la fuente de hidrógeno fuese exclusivamente las energías renovables. Incluso, analizando el proceso completo, aunque se trata de un método caro (altas temperaturas y presiones, captura de CO₂, etc.), es menos costoso que los procesos con energías renovables llevados a una escala industrial.

Se trata por lo tanto de una estrategia de relativamente bajo riesgo que supondría el inicio de un proceso de transición energética hacia la Economía del Hidrógeno, la cual permitiría resolver la crisis energética que se nos plantea a las futuras generaciones. [1, 7, 9]

2.6 Pilas de combustible

Las pilas de combustible son dispositivos que permiten la conversión de la energía química de una sustancia en energía eléctrica y calor mediante un proceso electroquímico. Esta transformación utiliza directamente la energía libre disponible en el combustible a su temperatura de operación, alcanzando rendimientos superiores a los procesos convencionales. En ellos, la energía química del combustible se transforma en primer lugar en energía térmica contenida en un fluido (vapor de agua, por ejemplo), posteriormente en energía mecánica y finalmente en energía eléctrica. En las pilas de combustible se pasa directamente de energía química a eléctrica sin otro tipo de conversiones intermedias.

Los equipos de pila de combustible están constituidos por dos electrodos (uno positivo o cátodo y otro negativo o ánodo), un electrolito que los separa y se encarga de transportar los iones producidos en las reacciones redox, una matriz que contienen al electrolito cuando no es sólido y una placa bipolar que actúa como colector de corriente y distribuidor de los gases de la pila. Funciona como una pila convencional, con la diferencia de que los reactivos y los productos no están almacenados, sino que se alimentan y se extraen en continuo. [7]

En principio, cualquier compuesto químico susceptible de oxidación y reducción química que pueda alimentarse de forma continua a la pila puede utilizarse como combustible y oxidante respectivamente. Estos no reaccionan en un proceso rápido de combustión, sino que reaccionan por etapas en electrodos separados. De este modo, la cinética del proceso queda limitada por el tiempo que tardan las especies en difundirse entre los electrodos, a través del electrolito, y por la cinética de la reacción.

En el caso de las pilas de hidrógeno, las más utilizadas hasta el momento, el combustible es el hidrógeno, que se alimenta al ánodo, y el oxidante es el oxígeno, que se alimenta al cátodo. De este modo, el hidrógeno suministrado a la pila difunde a través del ánodo poroso, y activado por un catalizador reacciona sobre la superficie del ánodo con los iones OH^- , formando agua y liberando electrones. Los electrones circulan por un circuito externo, creando un flujo de electricidad, y el agua generada se dirige hacia el electrolito. Los iones OH^- son el resultado de la reducción del oxígeno, que reacciona en la superficie del cátodo con el agua del electrolito y los electrones del circuito exterior. El electrolito transporta los iones OH^- y completa el circuito, y el agua es eliminada de la célula. [7]

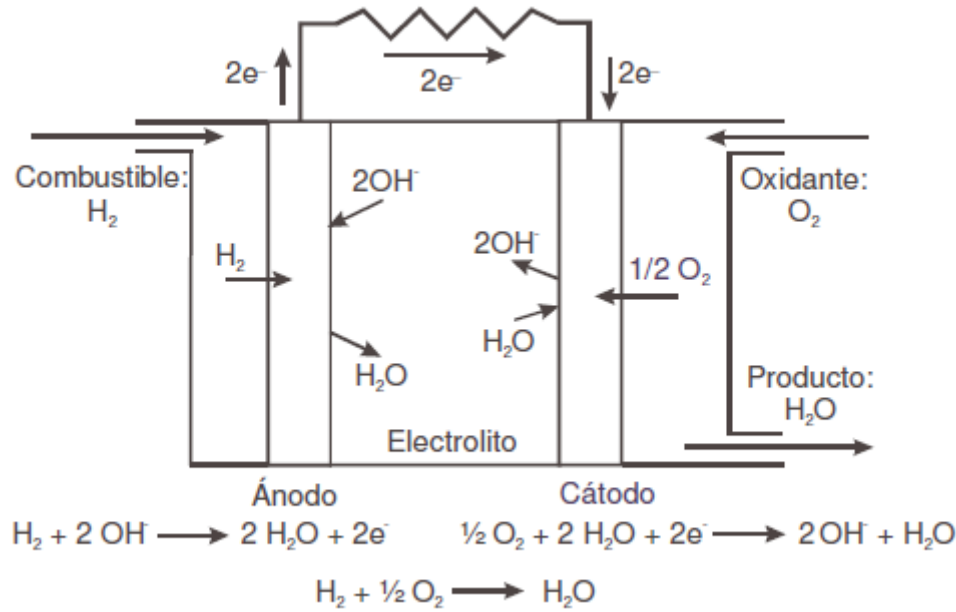


Figura 3. Funcionamiento de una pila de combustible de hidrógeno-oxígeno. Fuente: [7]

En la Figura 3 se muestra gráficamente el proceso global, indicándose las reacciones que tienen lugar en cada electrodo y la reacción global del sistema, que es la misma que la reacción de combustión del hidrógeno y que es altamente exotérmica. Sin embargo, en la pila de combustible, tan sólo una cantidad relativamente pequeña de calor es transferida entre la pila y su entorno. Además, la temperatura dentro de la célula de combustible es pequeña frente a la de los productos en las reacciones de combustión rápidas. Así, la reacción química se aprovecha para producir electricidad sin partes móviles y sin utilizar transferencias de calor intermedias como en las centrales térmicas convencionales. Además, los reactivos entran y salen separados, y la velocidad del proceso es lenta y se puede controlar con la difusión a través del electrolito.

En el proceso electroquímico también se libera energía en formas de calor, en mayor o menor medida según el tipo de pila, lo que permite incluso la posibilidad de utilizar la cogeneración (generación simultánea de electricidad y calor). La producción simultánea de electricidad en la pila y el aprovechamiento del calor generado, bien para obtener más energía eléctrica (en una turbina) o para suplir las necesidades térmicas de la instalación en donde esté ubicada la pila, permite obtener una mayor eficacia global en el sistema. Esta eficacia se calcula según la ecuación 2.1. [7]

$$\eta_{TOTAL} = \frac{Q + E}{Q_0} \quad (2.1)$$

Donde:

η : eficiencia global del proceso

Q: energía aprovechada en forma de calor

E: energía eléctrica producida

Q_0 : energía total disponible en el combustible utilizado

Este tipo de sistemas son más eficientes que cualquier sistema convencional considerado globalmente, proporcionando eficiencias de hasta un 50%. Aunque se considera que, en un futuro, se pueden llegar a alcanzar eficiencias de hasta un 75%. [7]

Existen diferentes tipos de pilas de combustible. La clasificación más extendida es la que hace referencia al tipo de electrolito utilizado, que a su vez condiciona la temperatura de operación de la pila, los materiales que pueden usarse, el tiempo de vida y las reacciones que tienen lugar en los electrodos. Así se tienen, por ejemplo, pilas alcalinas, de ácido fosfórico, poliméricas, de carbonatos fundidos, etc.

Finalmente, en cuanto a la aplicabilidad, esta tecnología de generación de energía eléctrica, se puede utilizar tanto en aplicaciones estacionarias, como móviles, como portátiles.

- Aplicaciones estacionarias: sistemas y plantas de producción de energía eléctrica. Se pueden emplear en una gran variedad de aplicaciones con un gran intervalo de potencia: del orden de vatios a megavatios.
- Aplicaciones móviles: motores de vehículos para el transporte terrestre y barcos de recreo. Para esta aplicación el tamaño y peso de la pila es un factor crítico, así como conseguir tiempos de respuesta rápidos y tiempos de puesta en marcha reducidos. En el caso del transporte público, las pilas de combustible han tenido mayor aceptación y se han desarrollado en mayor extensión que en los vehículos privados. Así, por ejemplo, en la actualidad en Madrid hay varios autobuses que utilizan una pila de combustible polimérica que se alimenta directamente con hidrógeno comprimido, que se obtiene, al igual que el hidrógeno del presente trabajo, por reformado de gas natural en una instalación estacionaria.
- Aplicaciones portátiles: equipos de pequeño tamaño, como ordenadores portátiles, teléfonos móviles y otros aparatos electrónicos portátiles. Sin embargo para este tipo de aplicaciones todavía hay que superar determinadas barreras tecnológicas, siendo la más importante la reducción del tamaño de las pilas para que puedan

ubicarse en espacios de tan solo 1 mm. Además, por razones de seguridad, en este caso no se recomienda el uso de hidrógeno como combustible primario, por lo que los sistemas desarrollados actualmente se basan en otro tipo de pilas de combustible, con otros reactivos, como las pilas de metanol directo de baja potencia. [7]

2.7 Almacenamiento

Para conseguir que se generalice el uso del hidrógeno como vector energético, se debe de lograr su transporte y almacenamiento de forma económica. Esto supone un considerable cambio con respecto al transporte y almacenamiento de los combustibles fósiles convencionales, debido a la baja densidad energética de este gas, por lo tanto se necesitan enormes volúmenes de hidrógeno para alimentar procesos con alta demanda energética.

En la actualidad existen distintas formas de almacenar hidrógeno, tanto para aplicaciones estacionarias como para el sector del transporte (en forma gaseosa, líquida, combinado químicamente o adsorbido en sólidos porosos), y su elección depende de factores como el proceso final en el que se vaya a emplear, la densidad energética requerida, la cantidad a almacenar y la duración del almacenamiento, la existencia de otras posibles formas de energía disponibles, los costes y necesidades de mantenimiento de la instalación, y los costes de operación. [9, 15]

2.7.1 Almacenamiento en forma gaseosa

Dado que el hidrógeno es producido en forma gaseosa y sus aplicaciones suelen requerir que se encuentre en este estado, la vía más simple podría ser su almacenamiento a alta presión [16]. Este tipo de almacenamiento, a presiones superiores a 20 MPa, requiere que los depósitos sean pesados y voluminosos, además de plantear cuestiones de seguridad tanto en los vehículos como en los depósitos de almacenamiento, distribución y carga de hidrógeno. [9]

Sin embargo, cuando se compara esta alternativa frente al empleo de otros combustibles, el almacenamiento de hidrógeno gaseoso en recipientes a presión no resulta competitivo debido a su baja densidad, al elevado coste de los recipientes a presión y del propio proceso de compresión del hidrógeno. [17]

2.7.2 Almacenamiento en forma líquida

La opción del almacenamiento en estado líquido en recipientes criogénicos requiere alcanzar temperaturas de almacenamiento muy bajas (21,2 K), haciendo inevitable su pérdida por volatilización incluso empleando las mejores técnicas de aislamiento. Además, el alto consumo energético asociado al enfriamiento, aproximadamente el 30% de la energía almacenada, hace que esta opción tenga un coste elevado. No obstante, a pesar de esta y otras dificultades de ámbito técnico (como la necesidad de convertir el hidrógeno a la forma “para”, una configuración que posee mucha menos energía, como se vio en el apartado 2.1.2 relativo a las propiedades termodinámicas), se ha conseguido desarrollar el almacenamiento líquido de hidrógeno de forma exitosa. [16, 18]

Por otra parte, para mantener las temperaturas tan bajas que requieren estos sistemas de almacenamiento, se utilizan recipientes aislados y a vacío llamados *Dewar*, o bien tanques de doble capa que contienen otro fluido criogénico intermedio como puede ser el nitrógeno líquido (cuya temperatura de ebullición, 77,35 K, es más elevada que la del hidrógeno).

Los recipientes a presión de hidrógeno líquido, en general, se construyen en una gran variedad de tamaños, desde botellas de laboratorio de un litro hasta *Dewars* de 3 millones de litros en las aplicaciones aeroespaciales. El funcionamiento de los depósitos varía y depende principalmente del tipo de aislamiento empleado, del tamaño y forma del depósito y del soporte estructural del mismo. [19]

La principal ventaja de este tipo de almacenamiento es que el hidrógeno ofrece así una densidad energética muy superior a la del hidrógeno gas. Comparativamente, en más caro que el hidrógeno gaseoso a alta presión, sin embargo los tanques de almacenamiento son mucho menos costosos que los utilizados para almacenarlo como gas, y la reducción de volumen que requiere el hidrógeno líquido hace que su uso sea la opción más atractiva en muchos casos. [20]

2.7.3 Combinación química con hidruros metálicos

El almacenaje por combinación química con hidruros metálicos surge con el fin de superar los inconvenientes que presentan los almacenamientos gaseosos (muy voluminosos y altas presiones) y líquido (caro y necesidad de depósitos criogénicos), tratados anteriormente.

Numerosos metales de transición, y sus aleaciones, pueden ser utilizados para formar hidruros metálicos. Estos hidruros se forman por reacción con hidrógeno, siendo este absorbido en la estructura metálica, y pudiendo ser desorbido gracias a pequeñas variaciones de presión. [9]

El almacenamiento se produce del siguiente modo:

- Se parte del metal libre de hidrógeno.
- A una temperatura dada el hidrógeno se disuelve en la fase metálica aumentando la presión.
- Conforme aumenta la presión, los incrementos en el contenido de hidrógeno son cada vez menores, hasta que el material puede considerarse cargado.
- En la descarga, la presión disminuye de manera que debe suministrarse calor si se quieren mantener condiciones isotermas. [19]

Sin embargo, los problemas de esta técnica están relacionados con la transferencia de calor, el deterioro del lecho metálico, la seguridad, la fragilización, la baja densidad de almacenamiento y la baja densidad de energía. Además, esta alternativa presenta un serio problema relacionado con el elevado peso del sistema de almacenamiento debido a los bajos niveles de retención de hidrógeno que se consiguen.

Más concretamente, la emisión y absorción de calor asociada a los procesos de hidrogenación y deshidrogenación parece causar daños en la estructura de los hidruros metálicos debido al cambio de volumen. Por otra parte, la velocidad en el proceso de carga y descarga del hidrógeno depende del coeficiente de transmisión de calor en el lecho metálico y de las presiones y temperaturas de almacenamiento. Sin embargo no se trata de un aspecto que no pueda ser superado o que haga inviable la técnica. [9, 19]

2.7.4 Adsorción en sólidos porosos

Recientemente se ha planteado la posibilidad de llevar a cabo el almacenamiento de hidrógeno mediante adsorción en un sólido poroso, lo que presentaría la ventaja de ser una forma más segura y sencilla de manejar el hidrógeno, reduciéndose drásticamente la presión necesaria para su almacenamiento.

En este sentido, los primeros trabajos publicados basados en nanoestructuras de carbono mostraban almacenamientos excepcionales de hasta el 60% en peso. Desde entonces, se está dedicando un gran esfuerzo al estudio de nanoestructuras de carbono con elevada superficie específica, no obstante sigue siendo necesario operar a temperaturas muy bajas. [9]

2.8 Transporte

Actualmente, los grandes consumidores de hidrógeno en la industria química (plantas de producción de amoníaco, plantas petroquímicas...) suelen producir el hidrógeno necesario dentro de la propia planta. Sin embargo, en un futuro escenario basado en la Economía del Hidrógeno, expuesta anteriormente, será necesario transportar grandes cantidades de hidrógeno entre diferentes regiones. Por esta razón, se considera el transporte mediante grandes tuberías, análogas a los gasoductos, y en fase líquida mediante grandes buques, análogos a los grandes buques gaseros LNG y LPG.

De todos modos, para poder aplicar la tecnología existente para el gas natural en el caso del hidrógeno, sería necesario introducir una serie de cambios en la tecnología existente debido al diferente comportamiento que presentan ambos gases. De este modo, en el caso de las tuberías habría que introducir cambios en ciertos parámetros como el diámetro, el nivel de presión o las distancias entre las estaciones de compresión. [1]

El método más económico de transporte dependerá de la distancia y de la cantidad transportada. Actualmente, para uso industrial, se transporta como gas a baja presión (7-21 bar) o a muy alta presión (207-345 bar), como hidrógeno líquido a través de gaseoductos o por carretera por medio de camiones cisterna y tanques criogénicos, y una pequeña cantidad en barco o en ferrocarril. [20]

A modo de resumen, en la Figura 4 se muestran las principales posibilidades para el transporte del hidrógeno, muchas de las cuales se desarrollarán a continuación.

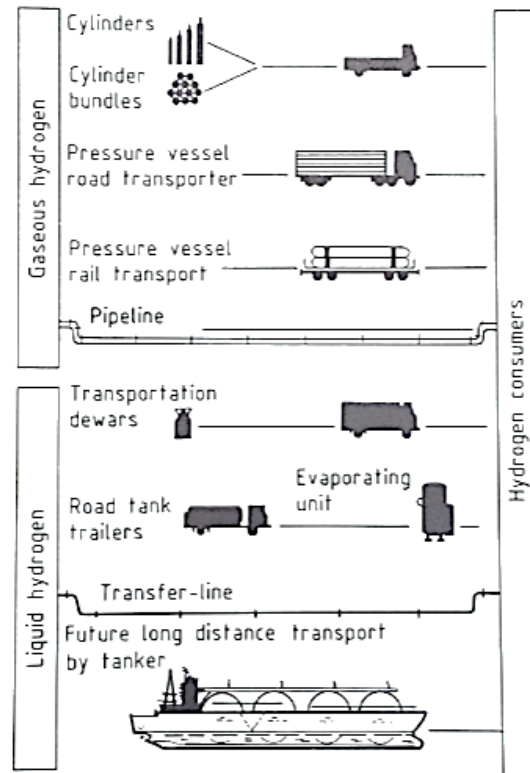


Figura 4. Posibilidades para el transporte de hidrógeno. Fuente: [1]

2.8.1 Transporte como gas comprimido

2.8.1.1 Gasoductos

Cuando se transportan grandes volúmenes, la distribución por vía de gaseoductos es actualmente la opción más económica. Suele llevarse a cabo en zonas industrializadas en que su generación está centralizada y las distancias involucradas son menores.

La creación de un sistema de distribución semejante al de la electricidad, el petróleo o el gas natural, requiere grandes inversiones, tecnología y equipamientos, además de tiempo.

El hidrógeno es distribuido mediante gaseoductos en varias zonas industriales de Estados Unidos, Canadá y Europa. Las presiones típicas de operación son 1-3 MPa, con flujos de 310-8900 kg/h de hidrógeno, normalmente a través de tuberías de 0,25 m de diámetro. Concretamente los Estados Unidos tienen ya más de 720 km de gaseoductos de hidrógeno. Éstos son propiedad de los productores de hidrógeno y están limitados a unas pocas áreas, donde se concentran grandes refinerías y plantas químicas, como Indiana, California, Texas y Louisiana. [20]



Figura 5. Gasoducto de hidrógeno. Fuente: [20]

El gaseoducto de hidrógeno más largo del mundo pertenece a la compañía Air Liquide y recorre 400 km desde el norte de Francia hasta Holanda, como se puede observar en la Figura 6.



Figura 6. Gaseoducto Francia-Bélgica-Holanda (Air Liquide Company). Fuente: [20]

En cualquier caso, de la misma manera que existe una red europea de gas natural, ya se prevé la construcción de una red extensa de gasoductos de hidrógeno. En este sentido se creó el proyecto HyWays, un proyecto subvencionado por la Comisión Europea, para la introducción del hidrógeno en los sistemas energéticos europeos. Esta red de gaseoductos de hidrógeno se muestra en la Figura 7. [20, 21]



Figura 7. Propuesta de red europea de gaseoductos de hidrógeno. Fuente: [21]

2.8.1.2 Por carretera

El gas comprimido también puede ser transportado utilizando camiones con cilindros a alta presión. Los camiones de tubos (*tube trailers*) consisten en varios cilindros montados en un marco protector. Pueden ser configurados para transportar entre 63 y 460 kg de hidrógeno, dependiendo del número de tubos. Las presiones de operación están entre 20 y 60 MPa. [20]

2.8.2 Transporte como hidrógeno líquido

2.8.2.1 Por carretera y ferrocarril

La licuefacción del hidrógeno es económicamente viable cuando los volúmenes necesarios son pequeños. El hidrógeno líquido es transportado usando tanques de doble pared, aislados, similares a los descritos en el apartado correspondiente del almacenamiento. En este

caso, estos camiones cisterna pueden transportar de 360 a 4300 kg de hidrógeno líquido. En el caso de los vagones en el transporte por ferrocarril pueden transportar de 2900 a 9100 kg de hidrógeno. Las tasas de evaporación en los camiones son de 0,3 a 0,6 kg/día. [20]

2.8.2.2 Por mar

Las barcasas y los buques de altura también son considerados para el transporte del hidrógeno a largas distancias y en grandes cantidades. Canadá ha desarrollado el diseño de algunos barcos para el transporte trasatlántico de hidrógeno, pero ninguno de ellos ha sido construido todavía. [20]

2.8.2.3 Tuberías

Por otra parte, al igual que sucede con el transporte en fase gaseosa, también existe la posibilidad de transportar hidrógeno líquido mediante tuberías. Deben de garantizar el aislamiento necesario y se deben de considerar todos aquellos procedimientos auxiliares que contribuyan a la seguridad y eficiencia del sistema, disponiendo de la instrumentación y control adecuados. Naturalmente, los materiales de construcción han de ser compatibles con las necesidades operativas, de modo que, no sólo se debe de garantizar una baja conductividad térmica del conjunto, sino que el material que esté en contacto con la fase líquida tiene que mantener la ductilidad a bajas temperaturas de operación, de manera que no se produzca la fragilización del mismo. [20]

2.8.3 Transporte en hidruros metálicos

También existe la posibilidad de transportar el hidrógeno que se almacena en hidruros metálicos. Se cargarían en contenedores y se transportarían en camiones hasta el lugar de consumo, en donde se podrían cambiar por un contenedor nuevo. Sin embargo esta no es una vía muy explotada. [20]

2.9 El gas natural

En este proyecto se pretende utilizar gas natural como materia prima para la producción de hidrógeno de alta pureza. Es una de las materias primas más utilizadas actualmente para su

producción, y como se ha visto no es viable una desvinculación inmediata del hidrógeno de los combustibles fósiles si se quiere producir a gran escala, por lo que este tipo de materias primas se perfilan como un buen punto de partida para una futura transición energética.

El caudal alimentado al proceso para producir 28900 t/año ($38000 \text{ Nm}^3/\text{h}$) de hidrógeno del 99,9% es de 72600 t/año de gas natural o $11500 \text{ Nm}^3/\text{h}$, considerando que la planta opera 350 días al año. En un primer momento se hace una estimación inicial del caudal de alimentación en base a los datos bibliográficos facilitados en *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry* [1], y a partir de ahí, mediante un cálculo iterativo, se ajusta el caudal de alimentación para obtener el caudal de producto fijado. Este caudal de producto se fija en $38000 \text{ Nm}^3/\text{h}$, ya que se trata de una capacidad típica de instalaciones similares a la del presente trabajo. [22, 23]

El gas natural consiste en una mezcla de hidrocarburos gaseosos con una serie de impurezas en diferentes proporciones. Está compuesto fundamentalmente por metano, etano, propano y butano. De forma genérica el gas natural presenta las composiciones recogidas en la Tabla 3. [24]

Tabla 3. Rango de composiciones típicas para el gas natural. Fuente: [24]

Componente	Fracción molar
Metano	0,75-0,99
Etano	0,01-0,15
Propano	0,01-0,10
n-Butano	0,00-0,02
Isobutano	0,00-0,01
n-Pentano	0,00-0,01
Isopentano	0,00-0,01
Hexano	0,00-0,01
Heptano e hidrocarburos más pesados	0,00-0,001
Nitrógeno	0,00-0,15
Dióxido de carbono	0,00-0,10
Sulfuro de hidrógeno	0,00-0,30
Helio	0,00-0,05

Más concretamente se selecciona la composición de alimentación al proceso sugerida por *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry* [1], y recogida en la Tabla 4:

Tabla 4. Composición de la alimentación exenta de azufre. Fuente: [1]

Componente	% mol.
H ₂	0,0
N ₂	1,0
CO	0,0
CO ₂	0,5
CH ₄	95,0
C ₂₊	3,5
H ₂ O	0,0

No obstante, esta composición no considera posibles compuestos azufrados que pueden llegar a acompañar al gas natural (fundamentalmente H₂S), y que convendría tener en cuenta, ya que nunca se podría asegurar que la alimentación está completamente exenta de azufre, y tan sólo unas ppm de azufre serían capaces de envenenar los catalizadores.

El BOE nº 6, de 7 de enero de 2013, en sus páginas 889-892, sobre la Resolución del 21 de diciembre de 2012, de la Dirección General de Política Energética y Minas, establece las especificaciones mínimas de calidad del gas natural introducido en el Sistema Gasista Español. Algunas de estas especificaciones mínimas se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones de calidad del gas introducido en el Sistema Gasista Español. Adaptado del BOE nº6, de 7 de enero de 2013.

Propiedad (*)	Unidades	Mínimo	Máximo
Poder calorífico superior (PCS)	kWh/m ³	10,26	13,26
Densidad relativa (ρ_r)		0,555	0,700
H ₂ S + COS (como S)	mg/m ³	-	15
O ₂	% molar	-	0,01
CO ₂	% molar	-	2,5
Polvo/partículas		Técnicamente puro	

(*) Tabla expresada en condiciones normales de presión y temperatura (0 °C y 1,01325 bar)

De este modo se tiene que el contenido máximo permisible de H₂S en la alimentación es de 15 mg por m³ de gas natural. Por lo tanto una vez determinado el caudal de H₂S que acompaña a la alimentación se recalculan nuevamente las fracciones molares correspondientes a los demás componentes, que descenderán muy ligeramente. Así, se obtiene que la composición de la alimentación es finalmente la que se recoge en la Tabla 6.

Tabla 6. Composición real de la corriente de alimentación al proceso

Componente	% mol.
H ₂	0,0
N ₂	1,0
CO	0,0
CO ₂	0,5
CH ₄	94,9
C ₂₊	3,5
H ₂ O	0,0
H ₂ S	0,1

2.10 El vapor de agua

Además del gas natural, para llevar a cabo el proceso se necesita aportar vapor de agua como materia prima. Concretamente se necesitan 3 moles por cada mol de carbono alimentado, según Ertl, G., et al, en *Handbook of Heterogeneous Catalysis* [23]. Por lo tanto, para alcanzar la producción requerida, es necesario incorporar, antes de la etapa de reacción, 244400 t/año de vapor de agua.

2.11 El dióxido de carbono

Como subproducto del proceso se obtiene una corriente de salida de CO₂ del 99,99% y un 0,01% de H₂O, con un caudal de 19900 kg/h.

2.11.1 Almacenamiento y captura de CO₂

Actualmente no se dispone de ningún tipo de aplicación para el aprovechamiento del CO₂ a gran escala, por lo que, a nivel global, una gran parte del CO₂ generado por los grandes productores es emitido a la atmósfera. Esto es debido a que la demanda es varios órdenes de magnitud inferior al que estará disponible cuando se aborde la captura del mismo en un mundo con tecnologías de almacenamiento y captura de CO₂ totalmente desarrolladas. Un informe de Naciones Unidas de 2009 cifra en más de 28000 millones de toneladas el nivel de emisiones mundiales de CO₂ en 2006, un incremento del 31% respecto a 1990. [25]

Una de las soluciones que se plantea a este respecto y que actualmente está tomando más fuerza, es la necesidad de capturar y almacenar el CO₂, aunque algunas instituciones y

organizaciones como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC) mantienen reservas sobre si es un proceso viable. No obstante, este procedimiento ya se ha empezado a aplicar y existen algunos antecedentes. Por ejemplo, en Noruega se ha trabajado en la construcción de una planta donde hasta el 90% de los gases de combustión de gas natural y carbón son capturados y almacenados. Ya desde 1996, la petrolera noruega Statoil ha almacenado en torno a 1 millón de toneladas de CO₂ cada año en un depósito ubicado en el mar del Norte. Los responsables de la empresa conseguían así evitar el impuesto del gobierno noruego que graba a los emisores de CO₂ desde los años 90. Para ello, la petrolera construyó una plataforma especial, a través de la cual se inyecta el CO₂ en un acuífero salino situado a 800 metros bajo el fondo marino. Los defensores de este sistema estiman que los poros de ese gigantesco acuífero podrían almacenar todo el CO₂ producido en Europa a lo largo de este siglo. [25, 26]

El proyecto noruego no es un caso aislado y otros grandes proyectos relacionados con la captura, transporte y almacenamiento de CO₂ están en marcha en Estados Unidos, Canadá y Argelia. En Estados Unidos, el Departamento de Energía ha invertido 84 millones de dólares (a lo cual se suman inversiones procedentes de la propia industria, universidades, y otras instituciones investigadoras) en proyectos para apoyar el desarrollo de tecnologías que aumenten la eficiencia y reduzcan los costes del proceso de captura y almacenamiento de carbono (*carbón capture and storage*, CCS) para las actuales y futuras plantas que consuman combustibles fósiles en grandes cantidades.

En el caso de España, la Comisión Europea ha comunicado la aportación de 180 millones de euros para financiar el desarrollo de esta tecnología, invertidos en una primera fase en la construcción de una planta piloto de captura de CO₂ en la provincia de León y un almacén subterráneo experimental en la provincia de Burgos, que servirán de ensayo para proyectos industriales de mayor envergadura.

De este modo, si el almacenamiento subterráneo de CO₂ puede suponer una gran ayuda a medio plazo en la lucha contra el calentamiento global, buscar nuevos aprovechamientos para estos depósitos se plantea como una opción interesante y necesaria para reducir el alto coste de los mismos. Sin embargo, aunque existen numerosas investigaciones al respecto, la explotación final no está lo suficientemente estudiada. [25, 27]

En base a esto, la opción de enterrar el CO₂ producido en el proceso del presente trabajo se plantea como la opción más interesante de cara a producir un vector energético como el hidrógeno sin contribuir a las emisiones que genera el habitual aprovechamiento de los combustibles fósiles. Mediante esta opción, si bien no se conseguiría desvincular el hidrógeno de los combustibles fósiles, sí se conseguiría equiparar en gran medida este proceso con los que

generan el hidrógeno a partir de fuentes renovables, a nivel medioambiental, como se ha expuesto en apartados anteriores. No obstante, esta opción todavía no es viable en España en el corto plazo, por lo que en una primera fase, sería necesario utilizar el CO₂ en otras aplicaciones, como las que se describen en el siguiente apartado.

2.11.2 Aplicaciones del CO₂ en la industria química y de procesos

Actualmente, el CO₂ producido a escala industrial es recuperado como un producto secundario de otros procesos, como el del presente trabajo. Las principales aplicaciones de este CO₂ recuperado se tratan brevemente a continuación.

- **Industria química y farmacéutica:** Se emplea en inertización. Síntesis química, extracción con fluidos supercríticos, neutralización (pH) de aguas residuales o de procesos de transporte a baja temperatura.
- **Alimentos y bebidas:** El sector alimenticio emplea el CO₂ para la carbonatación de bebidas gaseosas, acondicionamiento de productos alimenticios. Sus propiedades de inertización y bacteriológicas se combinan bien con las del nitrógeno y aumentan la duración de los alimentos. En este sector también se utiliza como fluido criogénico en las operaciones de enfriamiento o de congelación o como nieve carbónica para la regulación de temperaturas durante la distribución de productos alimenticios. La cafeína también se elimina del café mediante CO₂.
- **Gas medicinal:** Con esta aplicación se emplea para crear una atmósfera similar a las condiciones fisiológicas durante la manipulación de órganos artificiales. Es utilizado también mezclado con aire u oxígeno como estimulante para mejorar la aireación del sistema respiratorio.
- **Industria metalúrgica:** Normalmente sirve para la protección del medioambiente. Se emplea, por ejemplo, para eliminar los humos rojos durante las cargas de chatarra y carbón, y los humos que se producen con la transferencia de metales preciosos. Pueden utilizarse pequeñas cantidades de CO₂ también en los procesos de reciclado de las aguas provenientes de drenado de minas.
- **Laboratorios y análisis:** El CO₂ supercrítico es la fase móvil en aplicaciones cromatográficas y de extracción.
- **Pulpa y papel:** En este tipo de industria se utiliza para regular finamente el pH en la fabricación de pastas recicladas o químicas después de un blanqueamiento alcalino, entre otras aplicaciones.

- **Electrónica:** En este campo es empleado generalmente en el tratamiento de efluentes líquidos o durante el enfriamiento de los componentes en ensayos climáticos de componentes electrónicos. Puede servir para aumentar la conductividad del agua ultra pura o para limpiar los abrasivos de piezas en forma de nieve carbónica, a fin de evitar la utilización de solventes orgánicos.
- **Ambiental:** La inyección de dióxido de carbono permite manejar el pH de los efluentes líquidos, de forma general. El CO₂ es una excelente alternativa para el control del pH del ácido sulfúrico. [27]

No obstante, por volumen, las principales aplicaciones son las siguientes: En torno al 51% del CO₂ producido en los Estados Unidos es utilizado en la industria alimentaria, y generalmente se vende en forma líquida. El 18% se emplea en la carbonatación de bebidas, tanto en la producción de refrescos, como de cerveza. En torno a un 10% se destina a la industria química, utilizándose como materia prima, para inertizar y presurizar, o también para enfriar. Otras aplicaciones incluyen: recuperación de fuel y gas de los yacimientos (6%) y procesado de metales (4%). [29]

3. MERCADO

Actualmente, el 96% del hidrógeno mundial se produce a partir de combustibles fósiles. En concreto, el 48% se genera mediante el reformado del gas natural con vapor de agua, como en el presente trabajo; un 30% procede del reformado catalítico de la nafta en refinerías e industrias químicas, un 18% procede de procesos de gasificación de carbón, un 3,9% de la electrolisis del agua, mientras que un 0,1% procede de otras fuentes. [20]

El mercado global de hidrógeno creció de 232,0 mil millones de metros cúbicos y 82,6 mil millones de dólares en 2010 a 255,3 mil millones de metros cúbicos y unos 96,6 mil millones de dólares en 2013. Y se espera un crecimiento medio del 3,5% en volumen y del 5,6% en capital desde el año 2014 al 2020. Dicho crecimiento se verá beneficiado por una fuerte actividad en el sector del petróleo, su principal consumidor, en relación con la creciente demanda de combustibles de bajo contenido en azufre, en respuesta a unas regulaciones ambientales más estrictas, que supondrán un aumento de la cantidad de hidrógeno necesario para producirlos. Otros fundamentos favorables para el hidrógeno se pueden encontrar en el crecimiento de actividades como la fabricación de otros productos químicos, y la producción de semiconductores, vidrio flotado, componentes de metal y procesamiento de alimentos. [20, 30]

El rápido crecimiento de muchas economías de la región Asia-Pacífico (especialmente las de China e India) convierte a esta región en el mayor consumidor mundial de hidrógeno en el 2013, registrando el 31,7% y el 30,3% del mercado global en términos de volumen y capital respectivamente. A Asia-Pacífico le sigue Norteamérica con un 29,4% y un 29,7% en volumen y capital respectivamente. Europa occidental estaría en el tercer puesto con un 24,5% (volumen) y un 25,2% (capital).

De 2014 a 2020, el mercado de Asia-Pacífico tendrá un crecimiento medio anual del 7,0% debido al aumento de la demanda, especialmente en China e India. En Norteamérica, el porcentaje respecto al total global decrecerá al 25,7% (volumen) y 26,9% (capital) y en Europa occidental decrecerá al 21,2% (volumen) y 23,5% (capital). No obstante, se prevén crecimientos positivos en valores absolutos en todas estas regiones. [30]

Por otra parte, en las regiones del centro y sur de América, el mayor crecimiento será dirigido por la economía brasileña mientras que en el este europeo, las economías de Rusia, Ucrania, Polonia y Rumanía serán las que obtengan mayores ganancias de hidrógeno. Dentro del continente africano y Oriente Medio, la mayor demanda de hidrógeno la lideraran las economías ricas en petróleo de Arabia Saudí e Irán, así como las crecientes economías industrializadas de Sudáfrica y Turquía.

En cuanto a las compañías del sector, el grupo Linde dominaba el mercado global de hidrógeno, con una cuota de mercado del 20% en 2013, seguido por Air Liquide S.A. y Praxair Inc. con un 18% y un 12% de cuota de mercado respectivamente. Otras grandes compañías a nivel global son Messer Group GmbH, Airgas Inc., Taiyo Nippon Sanso Corporation, Iwatani Corporation, Hydrogenics Corporation, Air Products and Chemicals Inc. y Showa Denko K.K. [20, 30]

4. PROCESOS DE PRODUCCIÓN, TECNOLOGÍAS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

4.1 Procesos de producción

4.1.1 Producción a partir de recursos fósiles

El hidrógeno se puede producir a partir de la mayor parte de los combustibles fósiles, de hecho, como se ha visto, en la actualidad aproximadamente el 96% de la producción mundial de hidrógeno se obtiene a partir de materias primas fósiles. No obstante, debido a la producción de

dióxido de carbono como subproducto de la obtención del hidrógeno, este CO₂ debe ser capturado y almacenado, para reducir las emisiones. [9, 20]

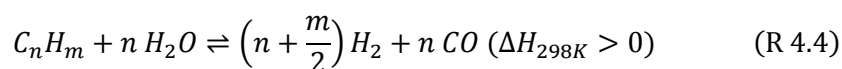
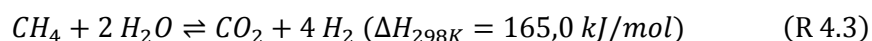
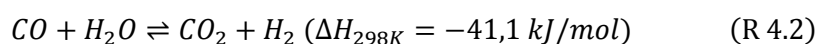
En la actualidad se están utilizando reformadores de gas natural de pequeña escala como proyectos de demostración para estaciones de llenado de hidrógeno en aplicaciones de automoción. A medio plazo, la producción combinada de hidrógeno y electricidad a partir de carbón en plantas de gasificación integrada en ciclo combinado, presenta muy buenas expectativas ya que, aunque los costes de inversión en estas plantas de gran escala son grandes, la cogeneración hidrógeno-electricidad puede ser muy eficiente y la separación y captura de CO₂ puede realizarse con costes bastante bajos. [20]

En función de la materia prima seleccionada existen las alternativas que se muestran a continuación.

4.1.1.1 Hidrógeno a partir de gas natural

El gas natural es actualmente la principal materia prima para la producción de hidrógeno industrialmente. Con el gas natural existen varios procesos alternativos:

- **Reformado de gas natural con vapor de agua:** Se basa en un conjunto de reacciones endotérmico, que opera a temperaturas entre 700 y 950 °C (aunque se puede iniciar a temperaturas de 350 °C), y presiones de 3 a 25 bar.



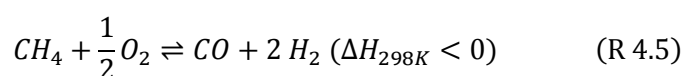
Estas reacciones ocurren de forma simultánea y se pueden utilizar como catalizadores níquel, óxido de hierro, etc. Pudiéndose obtener un gas de hasta el 75% de hidrógeno (en base seca), siendo el resto de los componentes óxidos de carbono fundamentalmente.

El hidrógeno se obtiene haciendo pasar la mezcla de gases a través de medios físicos de separación, como pueden ser las membranas o los lechos adsorbentes de tipo PSA.

A nivel de rendimiento energético, el reformado con vapor de agua, en plantas centralizadas, puede alcanzar eficiencias del 85% (sin considerar la compresión del

H₂), ofreciendo niveles bajos de emisión y bajos costes del hidrógeno producido. Actualmente, es la alternativa más extendida, y es el proceso a partir de gas natural más barato. [20, 31, 32]

- **Oxidación parcial del gas natural:** La oxidación parcial es un proceso exotérmico, en el que el gas natural se oxida solamente hasta CO al reaccionar con oxígeno gas, del que se obtiene una producción menor de hidrógeno por cada mol de metano que reacciona. En el proceso de reformado se obtenían 3 o 4 moles de H₂ por mol de CH₄ (de acuerdo con las reacciones R 4.1 y R 4.3), y en el proceso de oxidación parcial 2 moles de H₂ por mol de CH₄ (de acuerdo con la reacción R 4.5).



El proceso de reacción tiene lugar a temperaturas de entre 800 y 1100 °C. Son temperaturas más elevadas que en el reformado con vapor, pero el carácter exotérmico del proceso permite diseños de la planta más compactos. [20]

- **Reformado autotérmico:** Es una combinación de los dos procesos anteriores que se diseña de forma que el calor excedentario de la oxidación parcial se utiliza para abastecer las necesidades del reformado con vapor. La planta se dimensiona de modo que el proceso global sea ligeramente exotérmico. La temperatura de salida del reactor se sitúa entre 950 y 1100 °C, y la presión del gas puede alcanzar los 100 bar. El diseño y el control del reactor de este proceso es más complejo que en los casos anteriores. [20]

4.1.1.2 Hidrógeno a partir de carbón

La producción de hidrógeno por gasificación de carbón es también una tecnología madura y establecida comercialmente. El proceso es más complejo que el reformado de gas natural y, en general, el coste del hidrógeno producido por gasificación de carbón es más alto. Sin embargo, puede convertirse en un procedimiento de producción competitivo conforme los precios del gas natural aumenten.

El fundamento de la gasificación del carbón es su oxidación parcial en presencia de oxígeno y vapor de agua. Cuando este proceso se realiza a temperaturas superiores a 1000 °C, se produce fundamentalmente CO y H₂, el CO se desplaza a CO₂ y, por último, la mezcla

resultante de H_2 y CO_2 (con las impurezas asociadas) se separa utilizando procesos de absorción.

Esta técnica no es adecuada para plantas de producción descentralizada (de menores capacidades) debido a que presenta una gran economía de escala, es decir, para hacerla rentable es necesario disponer de grandes instalaciones, con una gran capacidad de producción. Además a esto se suma que la captura y almacenamiento de CO_2 en sistemas pequeños sería cara. Sin embargo, la producción de hidrógeno centralizada en plantas tipo GICC (Gasificación Integrada en Ciclo Combinado) es una opción particularmente atractiva tanto por la mayor eficiencia obtenida en la coproducción de electricidad e hidrógeno, como por las mejores posibilidades de captura de CO_2 . En los últimos años se está prestando una especial atención a la coproducción de electricidad y combustibles sintéticos (metanol, diésel Fischer-Tropsch e hidrógeno) a partir de carbón en plantas GICC, dada la preocupación por asegurar el suministro energético y disminuir las emisiones. [20]

4.1.2 Producción a partir de recursos renovables

4.1.2.1 Hidrógeno a partir de agua

Mediante diferentes procesos, es posible la separación de los átomos de la molécula de agua para obtener hidrógeno.

- **Electrolisis:** Es un proceso bien conocido por el cual se logra que el agua se separe en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de electricidad.

La participación de la electricidad en el proceso ofrece como ventaja la posibilidad de utilizar cualquier fuente primaria de energía para la producción de hidrógeno. No obstante, el principal inconveniente que se presenta en este proceso consiste en que, como la molécula de agua es muy estable, la energía que hay que poner en juego para lograr su separación es muy elevada (286,45 kJ/mol a 25 °C).

Una forma de paliar esta situación se centra en elevar la temperatura de trabajo. A temperaturas bajas, con agua en estado líquido, prácticamente toda la energía que es necesaria para la separación debe realizarse en forma de electricidad, pero conforme se eleva la temperatura, aunque la energía necesaria también aumente ligeramente, es posible sustituir parte de la electricidad por calor. Será por tanto interesante realizar la electrolisis a alta temperatura cuando se disponga de una fuente de calor residual procedente de otro proceso. En general se pretende siempre reducir el aporte eléctrico para la electrolisis porque el coste del hidrógeno producido está claramente dominado por el coste de la electricidad utilizada (con

independencia del tamaño del electrolizador utilizado), con lo que es un proceso de coste muy elevado.

La operación a alta presión y baja temperatura resulta más eficiente que a baja presión y alta temperatura. Estos aspectos resultan de especial relevancia a la hora del diseño de sistemas de suministro de hidrógeno, en los que se debe tener en consideración no solo el coste del electrolizador y de la electricidad, sino también los costes del compresor y del almacenamiento para el hidrógeno, a parte de los de operación y mantenimiento; al igual que en todos los demás procesos, si se quiere hacer una valoración económica y de costes verídica. [20]

- **Fotoelectrolisis:** Se tienen diferentes formas, estrategias o tecnologías para aplicar la electricidad para el proceso de electrolisis. De este modo, la fotoelectrolisis es la técnica por la cual se combinan la generación de electricidad fotovoltaica y la producción de hidrógeno en un único dispositivo. Para ello se utilizan células fotoelectroquímicas, formadas uniendo diversos materiales semiconductores. La utilización de sistemas de energía fotovoltaica conectados con electrolizadores es una tecnología que, fundamentalmente en aplicaciones remotas o en funcionamiento aislado de la red eléctrica, ofrece la ventaja de suministrar electricidad y un combustible (hidrógeno), con la flexibilidad que supone utilizar el hidrógeno como almacenamiento de la electricidad producida y no demandada. Estos dispositivos se encuentran en estado de investigación fundamental, pero en el ámbito del laboratorio ya han ofrecido eficiencias de conversión solar de hidrógeno del 16%. Esta tecnología será fundamental en una futura red distribuida de la energía, con un gran número de pequeños productores, pero actualmente no se puede plantear como un sistema de producción a gran escala.

De la misma forma que se puede aprovechar la energía eléctrica generada mediante paneles fotovoltaicos, también se puede aprovechar la energía eléctrica producida mediante aerogeneradores de un modo similar. En la Figura 8 se muestra el esquema de un proceso basado en ambas tecnologías. [20]



Figura 8. Producción de electricidad a partir de energía solar y eólica con hidrógeno como vector energético. Fuente: [33]

- **Descomposición del agua por ciclos termoquímicos:** El uso directo de energía térmica a alta temperatura para disociar el agua tiene la ventaja de que se evita una buena parte del consumo de electricidad necesario para la producción de hidrógeno a partir de agua. Como la descomposición directa de la molécula de agua por vía térmica es un proceso inviable en la práctica dado que se produce a temperaturas superiores a 2500 °C, se recurre a todo un conjunto de técnicas con el objetivo de reducir la temperatura requerida por este proceso. Entre ellas se encuentran los ciclos termoquímicos que están basados en la combinación de una serie de reacciones químicas operando en un ciclo cerrado en las que el hidrógeno se obtiene del agua y los reactivos se recuperan y reciclan. Como fuente de energía calorífica se puede utilizar o bien energía nuclear o bien energía solar térmica de alta temperatura, dependiendo de los niveles de temperatura que exija cada ciclo. Desde hace años se vienen desarrollando multitud de estos ciclos, aunque los más utilizados son:
 - Ciclos SI: basados en la familia del azufre y del yodo.
 - Ciclo UT-3: basados en bromuros de calcio y de hierro
 - Ciclos de óxidos sólidos: reacciones redox con óxidos metálicos entre las que destacan las del zinc, el hierro o el cerio.

Los dos primeros comenzaron a desarrollarse pensando en el uso de la energía nuclear utilizando reactores VHTR (*Very-High Temperature Reactor*). Y el último se orienta al uso de la energía solar térmica de alta temperatura utilizando centrales de concentración solar. En las Figuras 9 y 10 se muestran ejemplos de centrales de concentración solar y de estos ciclos termoquímicos. [20]

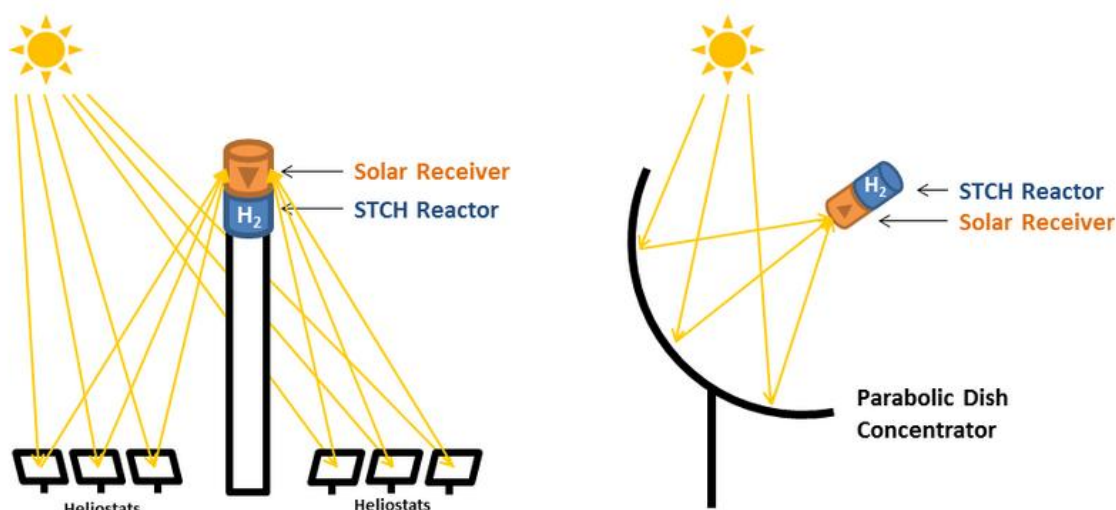
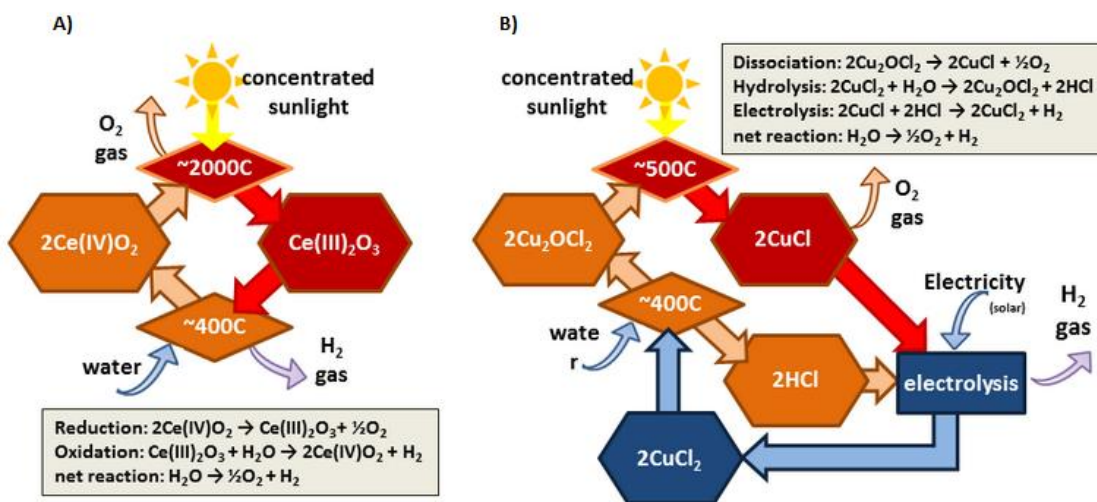


Figura 9. Esquemas de centrales de concentración solar. (STCH reactor = Solar thermochemical reactor). Fuente: [34]



A) Ciclo termoquímico directo, de dos pasos, basado en la oxidación/reducción de óxido de cerio. B) Ciclo termoquímico híbrido basado en cloruro de cobre y con una electrolisis adicional

Figura 10. Ciclos termoquímicos para la descomposición del agua. Fuente: [34]

4.1.2.2 Hidrógeno a partir de biomasa

Es posible obtener hidrógeno de la biomasa a partir de un gran número de procesos de tipo biológico y termoquímico, muchos de ellos se recogen en la Figura 11.

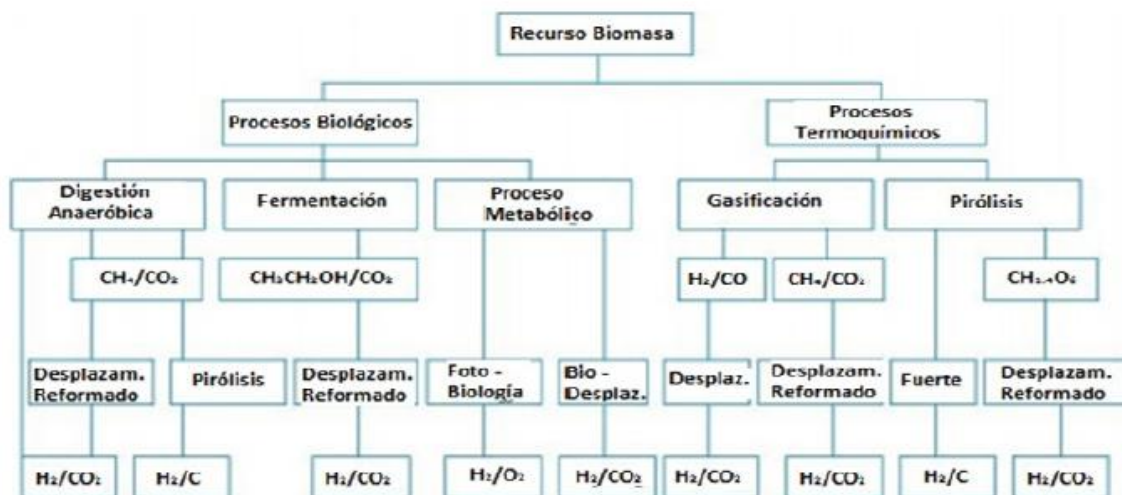


Figura 11. Procesos para la producción de hidrógeno a través de biomasa. Fuente: [20]

Los procesos biológicos son en general más lentos y costosos que los termoquímicos y en el futuro pueden llegar a jugar un papel importante en los sistemas de producción de hidrógeno descentralizados, mientras que la producción centralizada, a partir de biomasa, se basará fundamentalmente en procesos termoquímicos, entre los que destacan la gasificación y la pirólisis.

El interés de la biomasa como materia prima para la obtención del hidrógeno radica, por un lado, en que aporta un balance de CO₂ neutro, según los defensores de esta tecnología, ya que, teóricamente, la materia orgánica es capaz de retener durante su crecimiento el CO₂ que se libera durante la producción de hidrógeno. No obstante, en cuanto a este aspecto, no está totalmente claro que el balance sea exactamente neutro en cuanto a las emisiones de CO₂. Si toda la materia orgánica consumida se regenera, las emisiones serían menores, pero sería necesario considerar la energía consumida en los procesos de replantar la biomasa consumida (en el caso de los cultivos energéticos o la biomasa lignocelulósica, por ejemplo), así como la energía requerida para realizar el transporte de biomasa, que además sería necesario transportar en volúmenes mucho mayores a los de los combustibles fósiles debido a su baja densidad energética. Y toda esta energía requerida proviene de la quema de combustibles fósiles, por lo que se continuaría emitiendo CO₂, considerando el proceso global en su conjunto. Por otra

parte, un aspecto muy positivo de esta tecnología es que trabaja con una materia prima renovable, siempre que su consumo no exceda la capacidad de regeneración. [20]

No obstante, también sería necesario considerar otros aspectos potencialmente negativos de esta alternativa, y que pueden no ser evidentes en un primer momento. Como se ha dicho, la densidad energética de la biomasa en comparación con otros combustibles (combustibles fósiles) es baja; por lo tanto, para satisfacer la demanda energética, mediante biomasa, independientemente de los procesos de aprovechamiento que le sigan a continuación, sería necesario una gran volumen de producción. De este modo, para minimizar los costes de transporte, habría que disponer de cantidades ingentes de biomasa en las proximidades de los centros de producción, y entre los diferentes tipos de biomasa, se optaría, lógicamente, por cultivar aquellas especies con una mayor densidad energética, que no tienen por qué ser precisamente los cultivos o las especies tradicionales de la zona, por lo que se estaría alterando el ecosistema y reduciendo enormemente la biodiversidad de amplias regiones en las proximidades de los centros de producción. [20]

- **Gasificación de biomasa:** La gasificación de biomasa es un proceso similar al usado para la producción de hidrógeno a partir de carbón, aunque con una menor capacidad de producción de H_2 por unidad de masa de materia prima. Por lo tanto se requerirían grandes cantidades de biomasa, que incrementarían considerablemente los costes de transporte.

La composición del gas resultante de la gasificación dependerá del tipo de biomasa que se utilice y de si la gasificación se realiza con aire o con oxígeno. Si se realiza con aire, el resultado es un gas pobre compuesto por H_2 y CO , pero también por CH_4 , CO_2 , H_2O y N_2 , y en este caso, se suele realizar un reformado con vapor del gas pobre antes de llevar a cabo la reacción WGS (*Water gas shift*, similar a la que tiene lugar también en el proceso de reformado de gas natural con vapor de agua).

La formación de alquitranes es uno de los principales problemas técnicos para el desarrollo de la gasificación de biomasa. La cantidad de alquitranes generados depende de numerosos parámetros del proceso: características de la biomasa (tipo, humedad, tamaño de partícula, etc.) y condiciones de gasificación (temperatura, presión, tiempo de residencia del gas, velocidad de calentamiento de la biomasa, etc.). La condensación de los alquitranes en las zonas frías del equipo genera problemas de taponamiento y ensuciamiento, provocando paradas indeseadas de la instalación.

Además, la producción de hidrógeno a partir de la biomasa compite con la producción de combustibles sintéticos (metanol, diésel Fischer-Tropsch), como se puede observar en la Figura 12. [20]

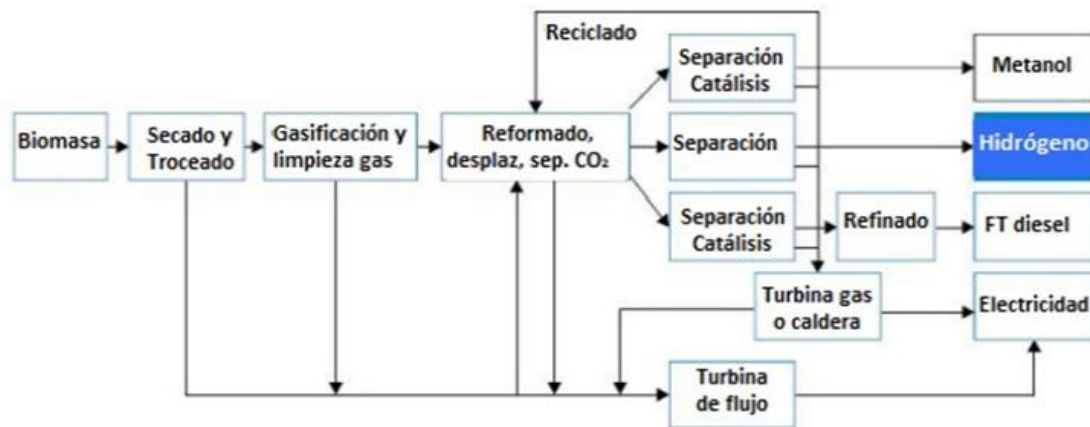


Figura 12. Producción de metanol, hidrógeno y diésel Fischer-Tropsch por gasificación de biomasa. Fuente: [20]

Tanto el hidrógeno como los biocombustibles presentan la misma ventaja de proceder de una fuente “renovable”, sin embargo los biocombustibles ofrecen ventajas adicionales, dado que su tecnología de producción se encuentra en un estado más avanzado de desarrollo y ya están siendo introducidos en el mercado del transporte a través de su infraestructura de suministro. [20]

- **Producción biológica de hidrógeno:** La producción biológica de hidrógeno se lleva a cabo en un biorreactor basado la producción de hidrógeno mediante algas. Las algas (específicamente la *chlamydomonas reinhardtii* y *chlamydomonas moewusii*) producen hidrógeno bajo ciertas condiciones. Al final de la década de 1990 se descubrió que si las algas eran privadas de azufre, dejarían de producir oxígeno mediante el proceso normal de fotosíntesis y pasarían a producir hidrógeno mediante un proceso de fotosíntesis alternativo. No obstante, existen una serie de problemas en cuanto al diseño de un biorreactor de este tipo, algunos de ellos se describen a continuación:
 - Inhibición competitiva de la producción de hidrógeno por fotosíntesis por dióxido de carbono.
 - Económicamente debe de alcanzar un precio competitivo comparado a otras fuentes de energía.
 - Baja eficiencia obtenida en el proceso de conversión de energía solar en energía química almacenada en el hidrógeno molecular. [20]

Además de todas estas alternativas que se han detallado anteriormente, se pueden introducir diversas variaciones en estos procesos, manteniendo los fundamentos en los que se

basan. Todas estas alternativas, y algunas de sus variaciones, como ampliar el rango de fuentes renovables de producción de hidrógeno también a la energía eólica o hidráulica, se recogen de forma esquemática en la Figura 13. [20]

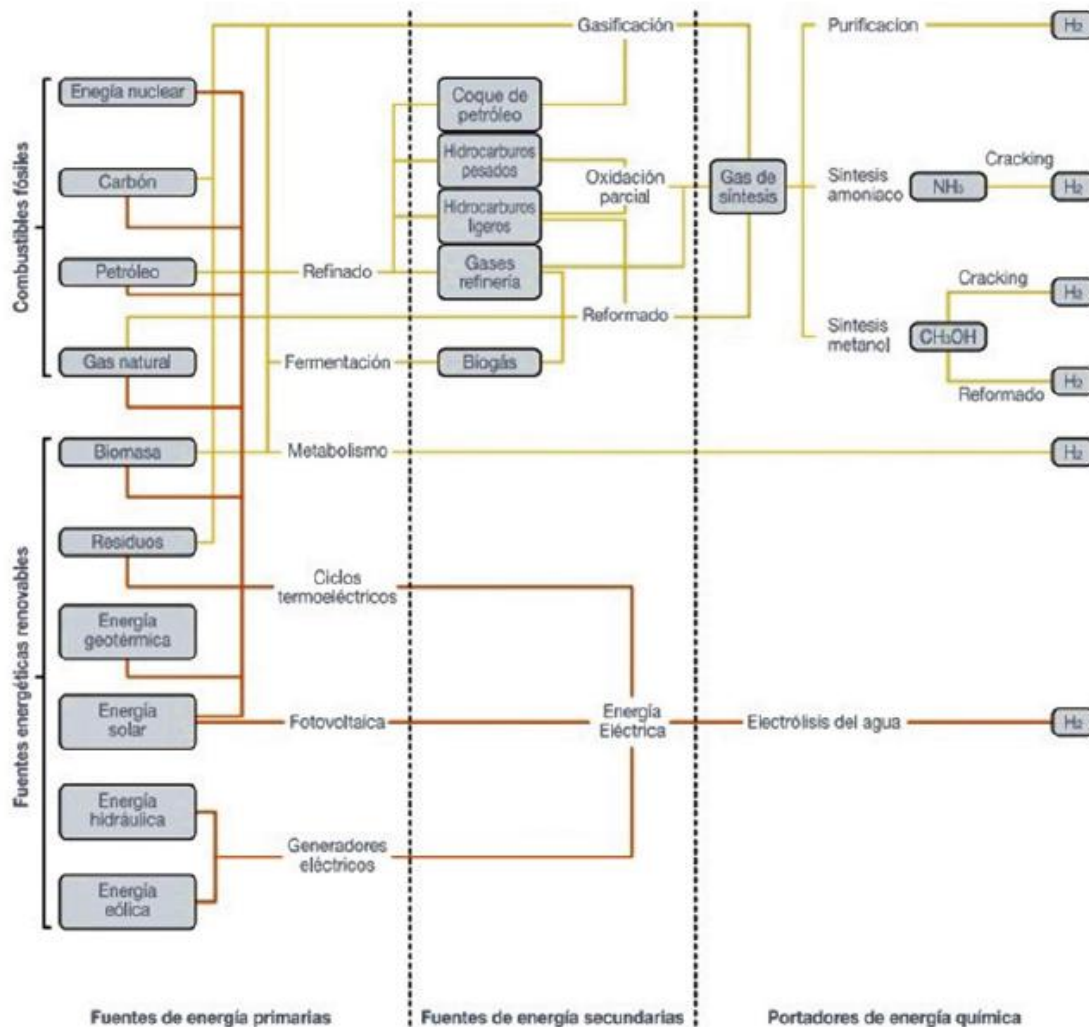


Figura 13. Esquema resumen de las técnicas y procesos de obtención de hidrógeno. Fuente: [20]

4.1.3 Selección de una alternativa

Cada una de las alternativas de producción presenta tanto aspectos positivos como negativos, muchos de los cuales ya han sido tratados a lo largo de la descripción de las propias alternativas en los apartados anteriores. Se trata por lo tanto de seleccionar la mejor alternativa de producción en el momento actual y para el futuro próximo.

Como se ha visto anteriormente, y aunque son alternativas prometedoras, desde el punto de vista de la producción, los procesos basados en energías renovables no se encuentran suficientemente desarrollados y a nivel industrial su coste es inasumible. Por lo tanto, sería

inviabile realizar una producción importante de hidrógeno mediante este grupo de alternativas. Incluso si se optase por un proceso a partir de fuentes primarias renovables a pequeña escala, sería mucho más relevante dentro de una estructura de producción energética, y de producción de hidrógeno, distribuida. Es decir, con una gran cantidad infraestructuras de producción de pequeña o media escala, y con las redes de transporte pertinentes que sean capaces de comunicar todos estos centros productores. Dado que esta infraestructura no está disponible, y es una tecnología que no está completamente desarrollada, no se contempla como la mejor opción. Este grupo de alternativas sería más adecuado considerarlas, probablemente, en un futuro escenario basado en la economía del hidrógeno, en donde el uso del hidrógeno esté mucho más extendido, como vector energético, y se cuenten con las infraestructuras necesarias.

Es en este punto en dónde cobra sentido explotar la vía de la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles, de forma que se pueda iniciar una transición en el modelo de producción y aprovechamiento de la energía. Esto es posible debido a que se trata de una tecnología muy conocida y con un coste de implantación relativamente bajo, en comparación con las alternativas basadas en las energías renovables. [7, 9, 14, 20]

De hecho, actualmente, las fases de implantación en las que se encuentran las diferentes alternativas de producción, que se muestran en la Figura 14, muestran como el reformado es de las pocas que ofrece la base necesaria para la explotación de la tecnología en el mercado.

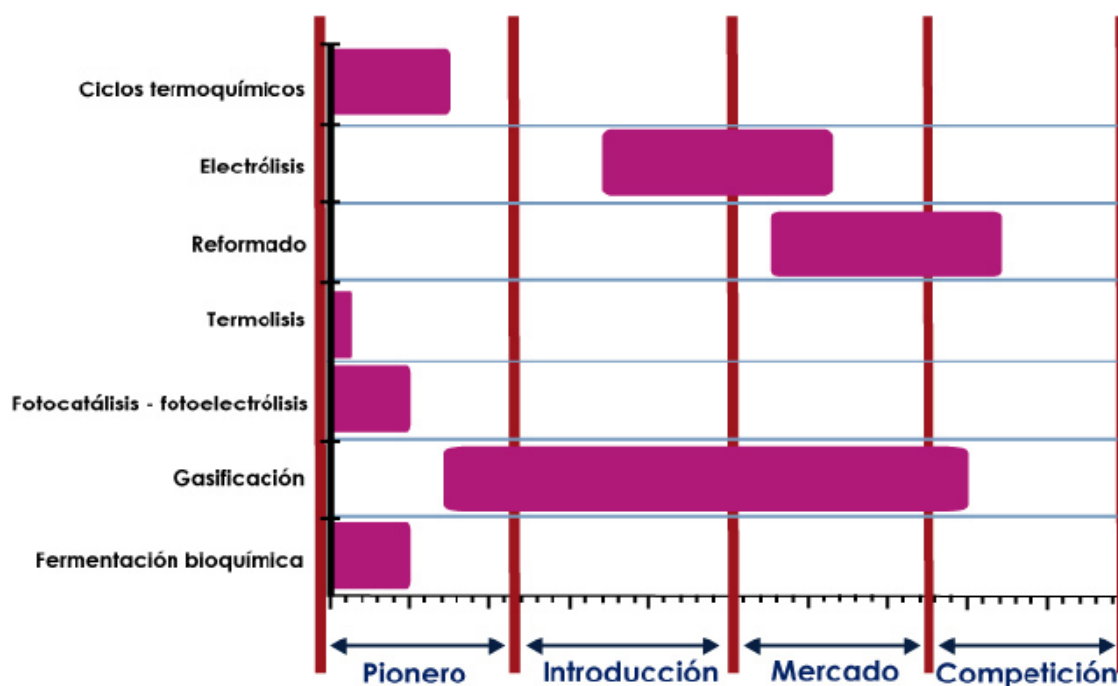


Figura 14. Fase de desarrollo en la que se encuentran las principales alternativas de producción de hidrógeno.

Fuente: [20]

Seleccionando las alternativas que se encuentran en una mejor fase de desarrollo (mercado-competición), se tendría por lo tanto: reformado de combustibles fósiles, gasificación de biomasa, y electrolisis del agua. Con estas alternativas, si se comparan a nivel económico, se obtiene una estimación de los costes de producción como la que se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Coste de un kg de hidrógeno según las fuentes de producción. Adaptado de: [20]

Fuente	Coste	
	(\$/kg)	(€/kg)
Gas natural	1,72	1,34
Carbón	2,38	1,85
Biomasa	2,74	2,13
Agua	4,80	3,73

De esta forma se tiene que la alternativa más viable actualmente para la producción de hidrógeno es aquella que parte de gas natural (tratándose además de un combustible mucho más limpio que el carbón) y que lo trata mediante reformado con vapor de agua.

El principal aspecto negativo sería el medioambiental, debido al CO₂ generado en el proceso. Pero para solventarlo se puede introducir un sistema de captura del mismo (absorción). Este CO₂ sería además de alta pureza, por lo que se podría plantear su aprovechamiento en otros procesos, o capturarlo en yacimientos y otras estructuras geológicas. Esta última opción se plantea cada vez más interesante, como se ha comentado anteriormente en el apartado correspondiente a la descripción de los sistemas de almacenamiento y captura de CO₂. [20, 25, 28]

El proceso seleccionado se muestra esquemáticamente en la Figura 15.

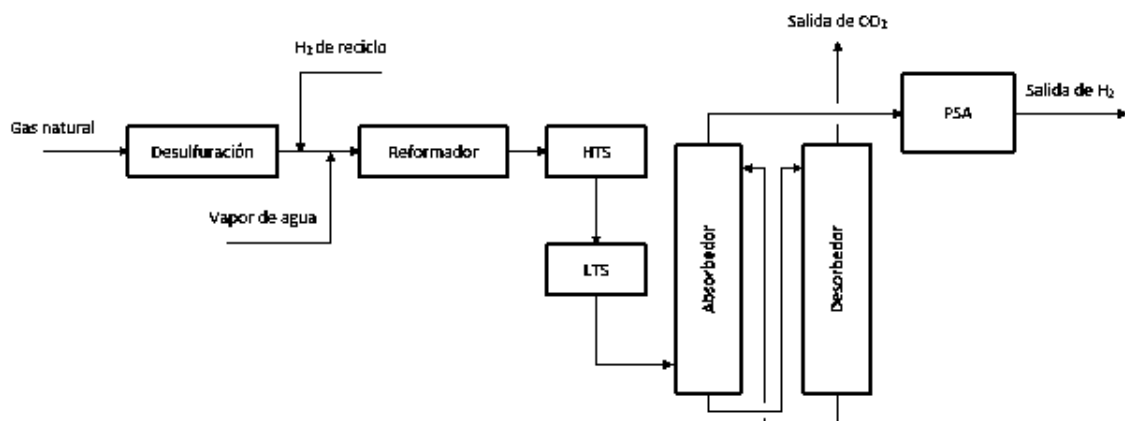


Figura 15. Diagrama de bloques del proceso de reformado de gas natural con vapor de agua

Las principales unidades y sistemas de este proceso son:

- Sistema de desulfuración.
- Reformador: donde se llevan a cabo las reacciones de formación del gas de síntesis (CO , CO_2 y H_2).
- Reactores *shift* de alta (HTS) y baja temperatura (LTS): donde se llevan a cabo reacciones de transformación del CO en CO_2 , con producción adicional de H_2 .
- Sistema de absorción-desorción para la separación del CO_2 .
- Sistema de adsorción por cambio de presión PSA (*pressure swing adsorption*) para la purificación final del H_2 producto.

4.2 Tecnologías alternativas

Además de las diferentes alternativas de producción de hidrógeno, una vez seleccionado un proceso concreto, las principales unidades del mismo pueden ser de diferentes tipos, pueden emplear diferentes productos auxiliares, o se pueden disponer de acuerdo a diferentes tecnologías alternativas.

4.2.1 Reformador

El reformador es la principal unidad de transformación química. El objetivo del diseño de dicho equipo es conseguir la máxima temperatura a la salida y en consecuencia obtener el mayor grado de conversión posible, pero minimizando el gasto de combustible.

En función de la capacidad de producción y de la disposición de los elementos internos del reformador (tubos empacados y quemadores) se pueden distinguir diferentes tipos. [1]

4.2.1.1 Reformadores cilíndricos

Para plantas de producción de pequeña escala (menos de 1000 m^3 (STP)/h) se pueden emplear reformadores cilíndricos. Este tipo requieren el menor gasto de materiales de aislamiento y estructurales y pueden ser prefabricados en un taller. En consecuencia, el tamaño máximo que pueden alcanzar es limitado por la capacidad de carga del medio de transporte utilizado. [1]

En función del número de tubos empacados necesario se pueden distribuir de diferentes maneras. En la Figura 16 se recogen diferentes alternativas de colocación.

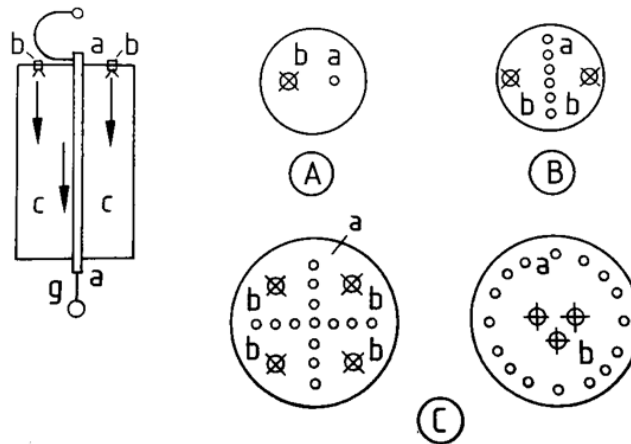


Figura 16. Configuraciones de reformadores cilíndricos. A) pequeña escala, planta piloto; B) configuración estándar; C) configuración para alta capacidad (5000 m³ (STP)/h). a) tubo empacado; b) quemador; c) sección de combustión; d) sección de convección; e) canal de gases de combustión; f) sistema de distribución del gas de entrada; tubo de gas de salida; h) colector; i) soplador de gases de combustión; j) *stack*. Fuente: [1]

Debido a la variación de la distancia entre tubos y quemadores y a la del flujo de calor circunferencial en cada tubo, no es posible alcanzar una buena distribución de calor. Para solucionarlo se debe diseñar este tipo de reformadores a partir de un bajo flujo de calor y tubos de escasa longitud. [1]

4.2.1.2 Reformadores rectangulares

Para aquellos casos en los que se requiera capacidades de producción mayores, se emplean reformadores con una planta cuadrada, los cuales son de mayor tamaño que los cilíndricos. Este tipo permite albergar un número mayor de tubos empacados y presentan una mejor distribución del calor.

En este tipo de reformadores la radiación se distribuye alrededor de los tubos minimizando el estrés mecánico de los mismos permitiendo diámetros mayores. Por ello, se puede reducir el número de tubos haciendo un reactor más compacto, con menos gasto en tuberías y menor número de quemadores. [1]

A su vez, se pueden distinguir diferentes tipos en función de la distribución de los tubos y los quemadores: *side-fired*, *top-fired*, *terraced-wall* y *bottom-fired*. [35]

- **Reformadores *top-fired*:** En los reformadores *top-fired* los quemadores están colocados en el techo entre filas de tubos empacados con el catalizador. El calentamiento se produce directamente desde los gases de combustión a las paredes de los tubos. En esta configuración el calentamiento solo se produce en un nivel, calentando el gas natural en la entrada. El ratio entre tubos y quemadores es bajo y la distribución del gas de combustión producido es simple. Este tipo de reformador es compacto, utiliza poco acero y presenta una gran capacidad de tubos (600-1000). Sin embargo, el entorno operativo encima de la zona de combustión es complicado y la entrada de calor en el reformador es limitado.
- **Reformadores *side-fired*:** En este tipo de reformador los quemadores están situados en las paredes, los cuales proyectan el fuego directamente a una o dos filas de tubos o, más comúnmente, a las paredes del reformador. Esta configuración permite un calentamiento uniforme y un buen control. Sin embargo, esta configuración está limitada a 100-150 tubos por sección radiante permitiendo un bajo ratio entre quemadores y tubos y aumentando la complejidad del sistema de distribución de fuel gas. Debido a que emplea la radiación del refractario, la eficiencia térmica es baja.
- **Reformadores *terraced-wall*:** Consisten en una modificación del anterior tipo. En concreto, presentan diferentes niveles de calentamiento permitiendo mayor control de la temperatura.
- **Reformadores *bottom-fired*:** Dentro de los reformadores *bottom-fired* se pueden distinguir dos casos en función de que la alimentación fluya de forma ascendente o descendente dentro de los tubos. Los quemadores están localizados en el suelo a los lados de dos filas de tubos creando llamas finas y alargadas. Presentan una simple distribución del gas combustible y un único nivel de operación. No pueden albergar más de 200-300 tubos y la temperatura del metal que los compone es mayor en la salida de hidrógeno que en la entrada.

En la Figura 17 se recogen las distintas posibilidades en la configuración de un reformador rectangular.

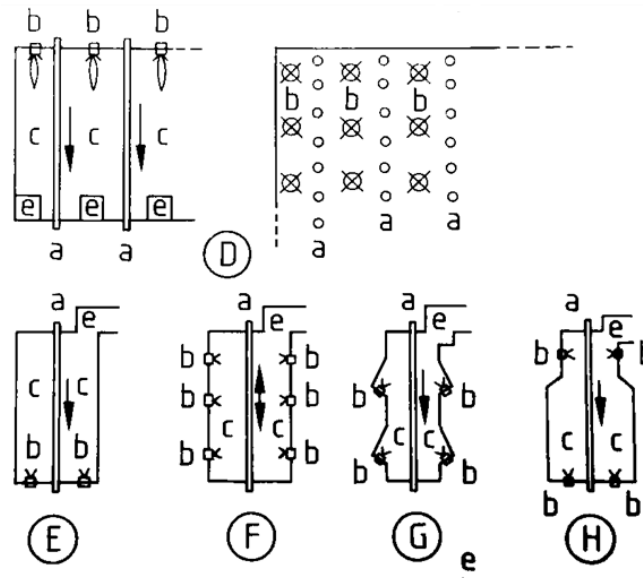


Figura 17. Configuraciones de reformadores de planta rectangular. D) configuración estándar; E) *bottom-fired*; F) *side-fired*; G) *terrace-wall*; H) configuración combinada. Fuente: [1]

4.2.1.3 Diseños especiales

En el intento de conseguir un diseño más económico se han estudiado otras alternativas que buscan mejorar la transferencia de calor, reducir el tamaño del equipo y maximizar la temperatura alcanzada (en los quemadores y en el gas de combustión).

En consecuencia, se pueden destacar otros tipos de reformadores con diseños diferentes a los antes mencionados.

- **Cámara de combustión presurizada.** La presión en la sección de combustión de los reformadores convencionales es atmosférica o ligeramente inferior. Esto se debe a una serie de consideraciones:
 - Construcción simple y operación segura.
 - Sellado fácil para cualquier número de tubos.
 - El gas residual (por ejemplo procedente del PSA) puede ser quemado a la presión más baja.
 - Se pueden usar quemadores de aire de combustión a baja presión.

En cambio, utilizar presiones elevadas mejora la transferencia de calor por convección del gas de combustión a los tubos empacados. En la Figura 18 se muestra un reformador construido con tal propósito. [1]

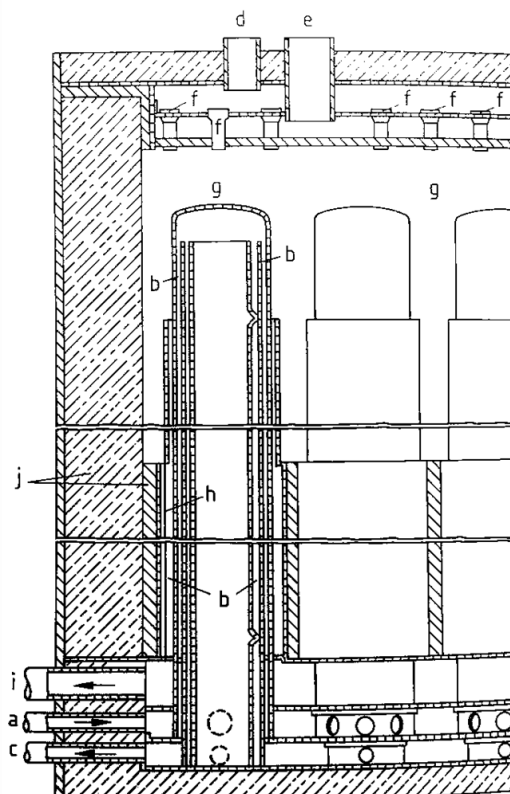


Figura 18. Reformador presurizado. a) entrada del gas; b) zona de reacción; c) salida del gas reformado; d) entrada del gas calefactor; e) aire de combustión; f) quemador; g) sección radiante; h) sección de convección forzada; i) salida de gases de combustión; j) aislamiento. Fuente: [1]

El catalizador se encuentra en un espacio concéntrico entre dos tubos con lo que la expansión térmica reduce los problemas de sellado. La presión del gas de combustión puede alcanzar valores de 300 a 500 kPa. Una desventaja de este sistema es que el gas combustible y el aire de combustión deben ser comprimidos. Este tipo de sistemas permiten capacidades de entre 120 y 5000 m³ (STP)/h.

- **Reformadores calentados por helio.** Una forma de aprovechar la alta temperatura de un reactor nuclear para la producción de hidrógeno a partir de metano es mediante la utilización de helio como fluido calefactor. La temperatura que el helio es capaz de alcanzar es de 900 °C, con lo que la diferencia de temperatura para la transmisión de calor es reducida. El diseño del reformador es similar a un reactor multitubular tradicional, sin embargo, su construcción es muy compleja por motivos de seguridad y otras consideraciones. [1]
- **Reformador calentado eléctricamente.** Para plantas de producción de hidrógeno de pequeño tamaño es posible emplear un reactor calentado eléctricamente. Además de ello, se emplean los gases calientes obtenidos para precalentar la

alimentación. La energía necesaria para su funcionamiento es menor que en los procesos de reformado de vapor tradicional y electrolisis. Por ello, es una opción a considerar para plantas de reducida capacidad. [1]

4.2.1.4 Selección del tipo de reformador

La presente planta de producción de hidrógeno presenta una elevada capacidad, por lo que se debe elegir una configuración del reformador que la permita. Por ello, quedan descartados los diseños cilíndricos y los especiales, siendo los rectangulares la mejor opción.

De los diferentes tipos de reformadores de planta rectangular se elige la configuración *top-fired* debido a que permite mayores capacidades en espacios más reducidos, reduciendo también los requerimientos de materiales estructurales y debido a su elevada eficiencia térmica.

4.2.2 Columnas de absorción

4.2.2.1 Selección de la tecnología de separación

Existen diferentes tecnologías para el lavado de los gases ácidos de un corriente de proceso, que en el presente trabajo son H_2S y CO_2 . Estos productos pueden ser absorbidos tanto física como químicamente en una serie de sustancias. La absorción química es adecuada únicamente para gases ácidos como el CO_2 , el H_2S , el COS y el HCN . Por otra parte, los procesos de absorción física se pueden emplear también para retirar otros compuestos como benceno o hidrocarburos más pesados.

Comparativamente, la absorción física se prefiere en el caso de grandes cantidades de gas a altas presiones y con altas concentraciones de impurezas. Mientras, la absorción química es especialmente útil para concentraciones medias o bajas de impurezas. Además, en el caso de la absorción química, se debe garantizar que no hay componentes en el gas a tratar que reaccionen de forma irreversible con el absorbente. El sulfuro de carbonilo (COS), por ejemplo, reacciona con la monoetanolamina (MEA) para formar sales muy estables. En casos como este, el absorbente no puede ser regenerado únicamente mediante cambios en la presión y la temperatura, por lo que se producen pérdidas de absorbente. [1]

Para realizar una primera estimación de cuál es el proceso de separación del CO_2 y del H_2S más adecuado, se pueden emplear gráficas como las recogidas en las Figuras 19 y 20.

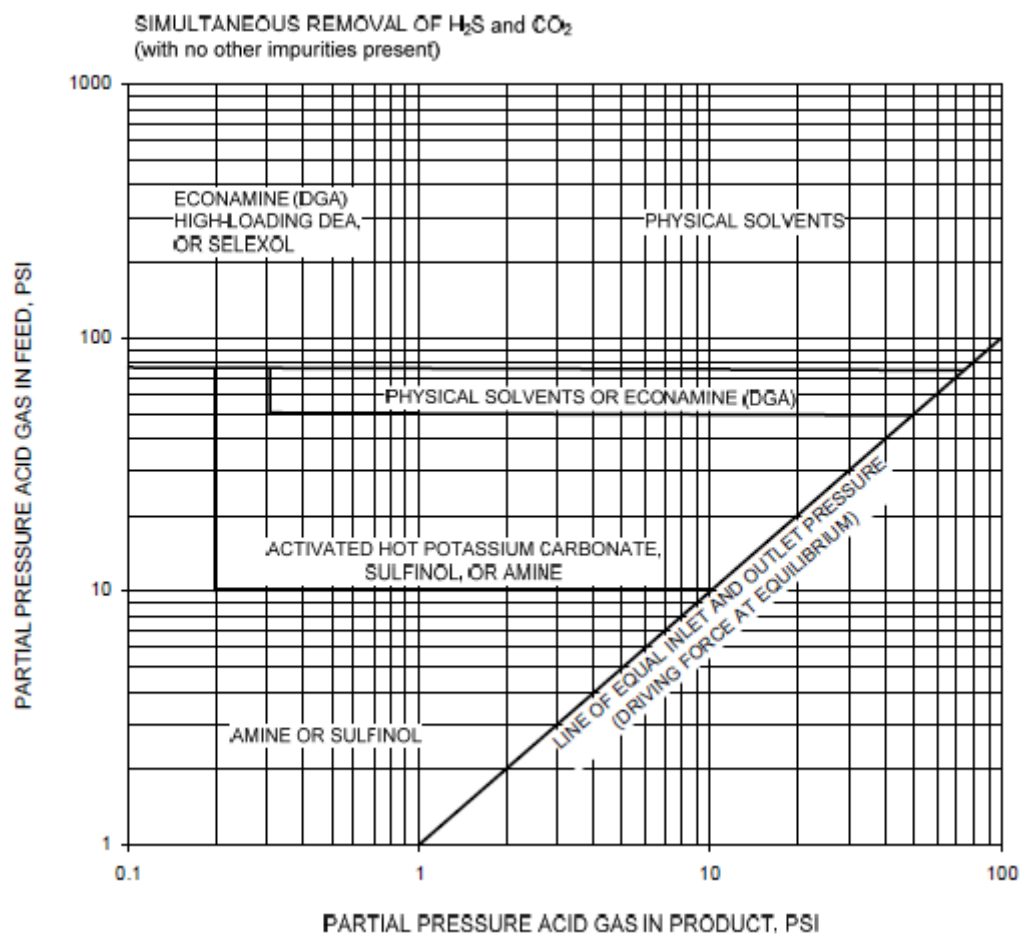


Figura 19. Gráfica para la selección de un proceso para la eliminación simultánea de H_2S y CO_2 . Fuente: [36]

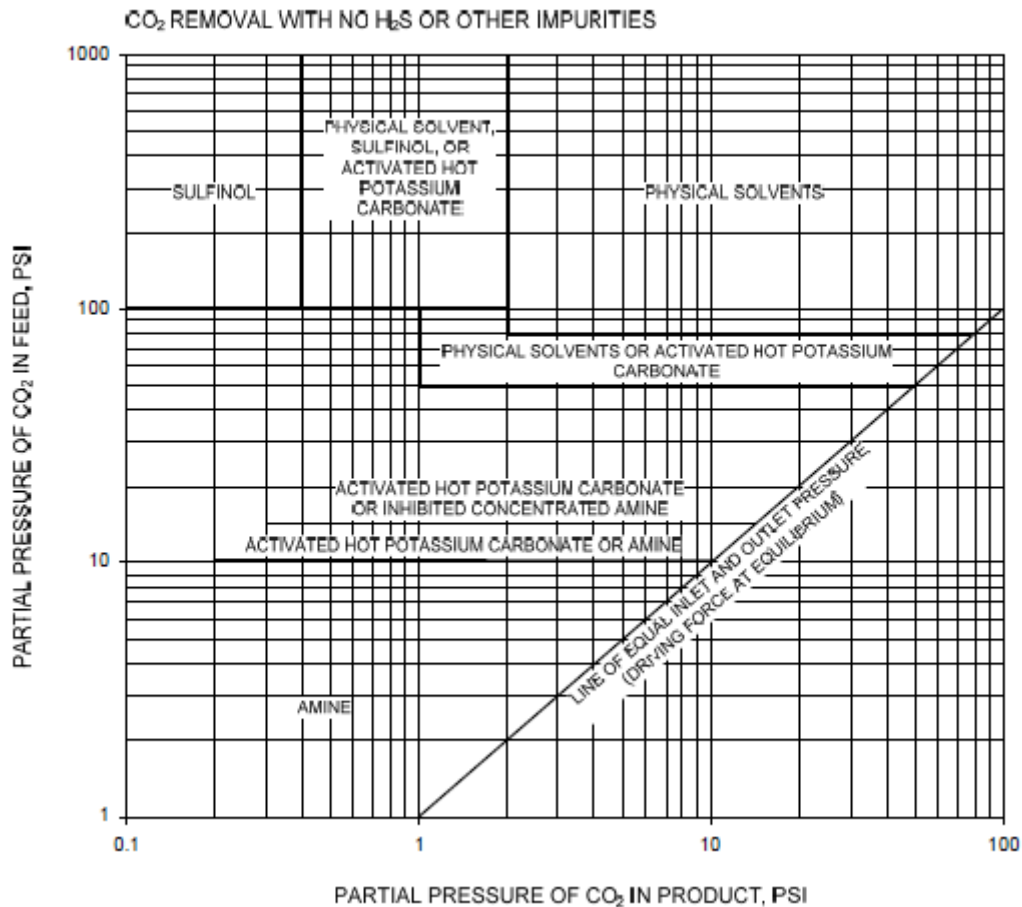


Figura 20. Gráfica para la selección de un proceso para la eliminación de CO_2 . Fuente: [36]

De esta forma, en el caso de la corriente 1, que alimenta al absorbedor C-101, se utiliza la Figura 19, dado que contiene mezcla de H_2S y CO_2 , que se eliminarán conjuntamente. De este modo, como la presión parcial de entrada de estos gases ácidos es de 1,2 psi y la de salida 0,9, el proceso de separación que se recomienda es el de absorción con aminas.

Por otra parte, para la corriente 27, que alimenta al absorbedor C-301, en donde únicamente se elimina CO_2 , sería necesario utilizar la Figura 20. En este caso, la presión parcial del CO_2 en la corriente de entrada es de aproximadamente 50 psi y la presión parcial de salida de los mismo es de 2 psi. Se trata por lo tanto de un punto en la frontera de dos regiones, por lo que se puede optar por diversos procesos: aminas fuertes o concentradas, carbonato de potasio o disolventes físicos. Finalmente se optará por la absorción con amina fuerte, como recomiendan otras fuentes como Prakash D. V. y Vijaykumar V. M. [37].

4.2.2.2 Tipos y selección de la amina de operación

La selección del tipo de amina que se emplea en la disolución absorbente depende de las condiciones de operación, de las presiones parciales de los gases ácidos y de la pureza requerida en el gas tratado. [36]

Las características, ventajas y desventajas de las diferentes aminas se tratan a continuación:

- Monoetanolamina (MEA): La MEA se utiliza de forma general en plantas de procesamiento de gas natural. Tiene la capacidad de absorción más alta y además como tiene el menor peso molecular, también ofrece la mayor capacidad para eliminar gases ácidos por unidad de masa, lo que implica menores tasas de circulación de disolvente. Estas, entre otras características, se resumen en las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Alta alcalinidad, lo cual incrementa la eficacia de la absorción.
- Alta capacidad de disolución de los gases ácidos a concentraciones bajas, especialmente en comparación con otras aminas.
- Disoluciones que hayan sido contaminadas pueden recuperarse con relativa facilidad.

Desventajas:

- Aparición de reacciones irreversibles con el COS y el CS₂, lo que conlleva grandes excesivas pérdidas de amina cuando el gas a tratar contiene importantes concentraciones de estas impurezas.
- Elevada corrosión en relación con otras aminas, especialmente cuando la MEA se encuentra en disoluciones con concentraciones mayores al 20% en peso.
- Elevado calor de reacción con el CO₂ y el H₂S, lo que conlleva mayores requerimientos energéticos para regenerar el absorbente.

La MEA es estable químicamente y el ratio de reacción con H₂S es mayor que con CO₂, pero los procesos en los que se encuentran ambos gases no se llegan a considerar selectivos, porque se produce la absorción de ambas especies simultáneamente.

Es el tipo de amina seleccionada, ya que presenta características adecuadas y es de uso común en aplicaciones similares a las incluidas en el presente trabajo. [36, 37]

- Dietanolamina (DEA): Se ha utilizado durante mucho tiempo para tratar gases de refinería con COS y CS₂, además de CO₂ y H₂S. Las ventajas y desventajas en relación a la MEA son:
 - La DEA da lugar a reacciones reversibles con el COS y el CS₂, por lo que se puede conseguir separar estos compuestos sin pérdidas significativas de absorbente.
 - Necesita menos energía para la regeneración, debido a calores de reacción más bajos.
 - Es más adecuada que la MEA para operar a presiones bajas debido a que tiene una presión de vapor más baja (es menos volátil).
 - Es más difícil recuperar las disoluciones contaminadas.
- Diglicolamina (DGA): Se utiliza para el tratamiento tanto de gas natural como de gases de refinería, debido a su capacidad para eliminar, no sólo H₂S y CO₂, sino también COS y mercaptanos. El proceso con DGA es similar al de MEA en muchos aspectos pero no se encuentra tan extendido.
- Metildietanolamina (MDEA): La MDEA se usa normalmente en un rango del 20 al 50% en peso. Bajas concentraciones son usadas generalmente en procesos a presiones muy bajas. Presenta ciertas ventajas respecto a otras aminas, tales como: baja presión de vapor, alta resistencia a la degradación, bajos problemas de corrosión (lo que permite emplear concentraciones de MDEA más elevadas que para otro tipo de aminas, hasta alcanzar niveles de corrosión similares), y sobre todo, selectividad en la absorción de H₂S en presencia de CO₂. Por lo tanto es especialmente utilizada cuando se necesita absorber preferentemente el H₂S. [36]

4.2.2.3 Selección del tipo de columna

Como se especifica en la parte B, del Anexo III. Cálculos justificativos, relativa al diseño del absorbedor C-301, la elección entre los dos tipos de tecnología básicos para las columnas de absorción (platos o relleno) sólo se puede hacer de modo riguroso calculando el coste de cada alternativa. Sin embargo, la elección se puede realizar en base a ciertos criterios empíricos, basados en la experiencia, considerando las ventajas y desventajas de cada opción, listadas en la mencionada parte B del Anexo III.

De este modo se decide instalar columnas de relleno, debido fundamentalmente a que se manejan productos corrosivos, tanto la disolución de monoetanolamina, como los productos de

la absorción del CO₂ y el H₂S, gases ácidos. Además, en principio, se consiguen caídas de presión más bajas. Por otra parte no es necesario instalar refrigeraciones intermedias en la columna para el mantenimiento de la operación, ni realizar extracciones laterales, aspectos que favorecerían la elección de una columna de platos. [38]

Como se detalla, nuevamente, en la parte B del Anexo III, existen muchos tipos diferentes de lechos de relleno, pero en el presente trabajo se emplean anillos Rasching cerámicos de 1½ in, resistentes a la corrosión, más baratos que otro tipo de relleno, y con una eficiencia que se considera suficiente.

5. EMPLAZAMIENTO

5.1 Criterios de selección

El proceso de selección del emplazamiento para alojar la planta de reformado de gas natural con vapor de agua presente se basa en los criterios generales listados a continuación: [39]

- Necesidad de espacio y distribución en planta, teniendo en cuenta aparcamientos, viales para la circulación de vehículos o almacenes, entre otros.
- Necesidad de vías de transporte como ferrocarril, carreteras, vías fluviales o puertos.
- Necesidad de energía eléctrica, agua, suministro de gas u otro tipo de fluidos.
- Requerimientos de alcantarillado, estaciones de depuración o recogida y eliminación de residuos.
- Necesidad de seguridad de protección contra incendios, como conducciones públicas o tanques de agua para suministrar presión.
- Necesidad de vigilancia, alarma contra robos y otras medidas de seguridad.
- Posibilidades de inversión en los terrenos y posibilidades de revalorización de los mismos.
- Disponibilidad de mano de obra, así como de su formación y coste.
- Disponibilidad de la materia prima.
- Mercado del producto.
- La geografía, el clima y el tipo de suelo de la zona.

5.2 Emplazamiento seleccionado

Teniendo en cuenta las consideraciones previas, el emplazamiento elegido es en el polígono industrial 223-A Sionlla situado al noreste de la ciudad de Santiago de Compostela. Las razones por la que se elige dicho emplazamiento son:

- **Desarrollo de socio-económico de Galicia.** Se elige la comunidad de Galicia para albergar dicha planta para favorecer su desarrollo socio-económico impulsando el sector energético.
- **Proximidad de la materia prima.** Como proveedor del gas natural se elige a Reganosa, la cual dispone de una terminal situada en Mugardos. Desde ahí, es capaz de suministrar gas natural por una red de gaseoductos a diferentes industrias, como las centrales térmicas de As Pontes y Meirama. En consecuencia, es posible la construcción de un nuevo gaseoducto para satisfacer las necesidades de la planta de reformado.
- **Disponibilidad del terreno.** Debido al tamaño de la planta se requiere una parcela lo suficientemente grande. De todos los polígonos industriales de la provincia de A Coruña, el de A Sionlla es el único con una plaza en venta que cumpla tales características.
- **Características del polígono.** El polígono de A Sionlla presenta servicios como energía eléctrica y saneamiento de aguas fecales y fluviales y unos buenos accesos.
- **Mano de obra.** Debido a su cercanía a un núcleo urbano dispone de la mano de obra suficiente, incluyendo mano de obra cualificada gracias a la existencia de la Universidad de Santiago de Compostela, capaz de formar Ingenieros Químicos capaces de trabajar en dicha planta. [40, 41]

El parque industrial de A Sionlla está incluido en el Plan Sectorial de Ordenación Territorial de las Áreas Empresariales en el ámbito de la comunidad autónoma de Galicia, de incidencia supramunicipal.

El polígono está delimitado por la AP-9 y el ferrocarril del Eje Atlántico por el sur, por el tramo previsto del nuevo orbital ferroviario de la ciudad de Santiago de Compostela por el este, la fábrica FINSA y el nuevo polígono de Costa Vella por el norte, y este mismo polígono y el Vial Periférico de la ciudad (Circunvalación N-550) por el oeste. [41]

El punto fuerte de A Sionlla es su facilidad de comunicaciones. Tiene un acceso inmediato a dos de las principales autovías gallegas, la AP-9 y la A-54, así como a la nacional N-550. Además el aeropuerto de Lavacolla se encuentra apenas a 15 minutos de distancia. Las distancias a las distintas ciudades de la comunidad autónoma se muestran a continuación. [42]

- A Coruña: 73 km.
- Ferrol: 91 km.
- Lugo: 110 km.
- Ourense: 106 km.
- Vigo: 92 km.
- Pontevedra: 67 km.

La ubicación dentro del territorio nacional se puede ver en la Figura 21, en la provincia de A Coruña en Galicia.



Figura 21. Localización del polígono industrial de A Sionlla en España. Fuente: adaptado de [43]

En la Figura 22 se muestra su localización dentro de la provincia de A Coruña.



Figura 22. Localización del polígono de A Sionlla dentro de la provincia de A Coruña. Fuente: adaptado de [44]

A continuación, en la Tabla 8 se detallan las características del polígono industrial de A Sionlla.

Tabla 8. Características del polígono industrial de A Sionlla. Fuente: [41]

Características	
Urbanísticas	
Provincia	A Coruña
Promotor	Xestur S.A.
Superficie total (m ²)	1.382.799,0
Superficie parcelas (m ²)	758.278,0
Servicios	
	Energía eléctrica en MT/BT
	Alumbrado público
	Red de telecomunicaciones
	Abastecimiento
	Saneamiento fecal
	Saneamiento pluvial
	Gas

En la Figura 23 se recoge una vista aérea del polígono de A Sionlla.



Figura 23. Polígono industrial de A Sionlla. Fuente: [41]

En la Figura 24 se muestra el parcelario de dicho polígono, donde se pueden observar las plazas libres en Mayo del 2016.

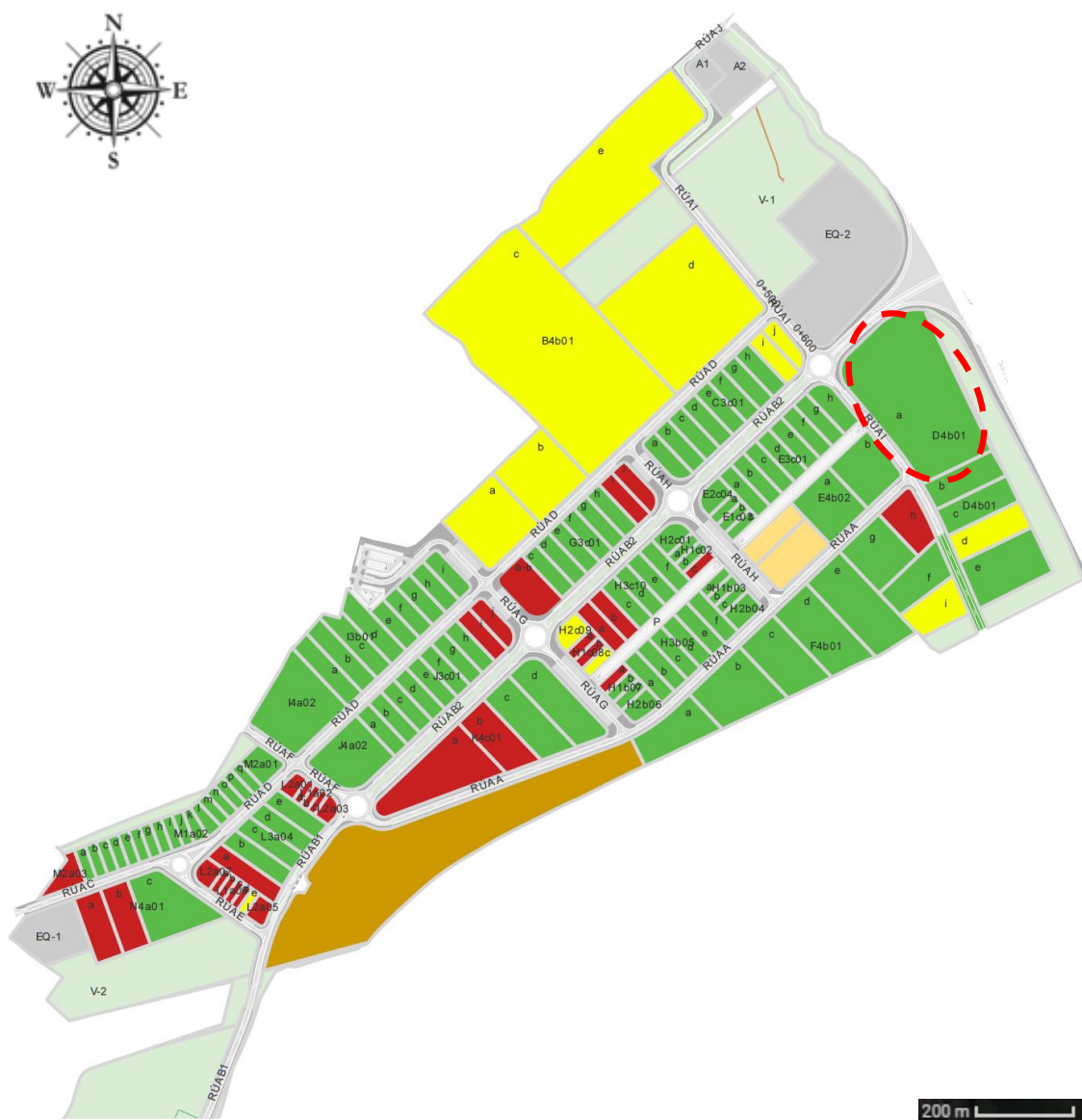


Figura 24. Parcelario del polígono industrial de A Sionlla. Parcelas: libre (verde), vendida (rojo), reservada (amarillo); zona verde (verde claro); parcela seleccionada (línea roja punteada). Fuente: adaptado de [41]

La parcela seleccionada es la denominada D4b01a, en la cual se permite cualquier uso industrial en todas sus variantes.

Las características de la parcela seleccionada se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Características de la parcela seleccionada dentro del polígono industrial de A Sionlla. Fuente. [41]

Características	
Número de parcela	D4b01a
Superficie (m ²)	44.932
Uso	Industrial
Precio (€)	3.617.026,00

6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La planta de producción de hidrógeno del presente trabajo, como se ha visto, utiliza como materia prima gas natural, alimentado a 2,40 kg/s y vapor de agua, alimentado a 8,08 kg/s. Por medio de una serie de transformaciones químicas y otras operaciones unitarias se obtendrá como producto principal una corriente de hidrógeno con una pureza del 99,9% y un caudal de 0,96 kg/s. Además se obtendrán como principales subproductos:

- Una corriente de CO₂ de elevada pureza (99,99%), con un caudal de 5,5 kg/s.
- Una corriente de fuel gas con alto contenido en hidrógeno y metano, con un caudal de 0,76 kg/s.
- Una corriente de gas ácido con alto contenido en compuestos azufrados con un caudal de 34,0 kg/h.

El proceso del presente trabajo se ha dividido en tres secciones, interconectadas por varias corrientes y que condicionarán la nomenclatura de los equipos. Todos los elementos considerados en el proceso estarán incluidos en alguna de las secciones.

- **Sección 100, pretratamiento de la alimentación.** Es la primera sección del proceso, en donde se encuentran el absorbedor C-101 y el desorbedor C-102. El objetivo de esta sección es la eliminación de los posibles compuestos azufrados que contenga el gas natural de alimentación. Los equipos de esta sección se identifican en los diagramas con los números que empiezan por 1.
- **Sección 200, sección de reacción química.** La corriente de gas natural desulfurada se introduce en esta sección, en donde tendrán lugar las reacciones de reformado propiamente dichas. En esta sección se incluyen, por lo tanto, el reformador principal, R-201, y los reactores *shift* de alta temperatura (*high temperature shift*, HTS) y baja temperatura (*low temperature shift*, LTS), R-202 y R-203 respectivamente. En esta sección se consideran también las corrientes de recirculación y la corriente de aporte de vapor de agua para el reformado. La

corriente de salida de esta sección tiene una pureza de hidrógeno del 60,6%, por lo que se hará circular a la sección de separación y purificación. Los equipos de la sección 200 se identifican en los diagramas con los números que empiezan por 2.

- **Sección 300, separación y purificación.** El objetivo de esta sección es el de someter la corriente de salida del último reactor (R-203) a una serie de procesos de separación, para poder alcanzar una corriente producto con una pureza del 99,9% de hidrógeno. De este modo, los principales equipos de esta sección son el separador de condensados S-301, el absorbedor C-301, el desorbedor C-302, y el sistema de lechos de adsorción por cambios de presión conocido como PSA (*pressure swing adsorption*). Los equipos de esta sección se identifican en los diagramas con los números que empiezan por 3.

A continuación se describirá en detalle el contenido de las diferentes secciones. Las composiciones que se nombran en esta sección se expresan en % molar.

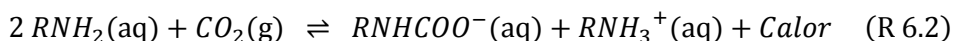
6.1 Sección 100, pretratamiento de la alimentación

Para retirar los componentes ácidos que puedan acompañar a la alimentación se emplea un sistema de absorción con aminas. En él se producen reacciones químicas entre los gases ácidos y la amina, para dar otra sustancia química. La disolución absorbente original se puede obtener regenerando la corriente líquida que se produce como producto de la absorción química. Para ello solamente es necesario elevar la temperatura y disminuir la presión. Esto es debido a que las reacciones son exotérmicas, por lo que aportando calor se desplazarían los equilibrios hacia los reactivos originales; y a que la solubilidad de los gases disminuye con la temperatura y aumenta con la presión. [36]

De esta forma, el gas natural entra por la corriente 1 con un caudal de 2,40 kg/s, introduciéndose en el absorbedor C-101 a una temperatura de 25 °C y una presión de 13 bar. Se obtiene el gas natural desulfurado, por la corriente 11, con un caudal de 2,39 kg/s y una composición de: N₂ 1,0%, CO₂ 0,47%, CH₄ 95,0% y C₂+ 3,5%, a una temperatura de 25 °C y una presión de 13 bar.

Para realizar la absorción se introduce una disolución acuosa de amina pobre (con bajo contenido en gases ácidos) de MEA 2,5M por la corriente 9, con un caudal de 0,146 kg/s, a 25°C y 13 bar. Saliendo por la corriente 2 la amina rica (con alto contenido en gases ácidos), con un caudal de 0,155 kg/s a una temperatura de 43,2 °C, como resultado de la absorción con reacción química del H₂S y el CO₂, y a una presión de 13 bar. Esta corriente se envía al

intercambiador E-101, en donde se calienta hasta 101,5 °C, y se envía a través de la válvula de estrangulamiento V-101, en donde se reducirá la presión hasta 1 bar, antes de entrar en el desorbedor C-102. Esto se hace necesario para favorecer el proceso de desorción, dado que, como se ha visto anteriormente, la solubilidad de los gases disminuye al aumentar la temperatura y reducir la presión, desplazando también el equilibrio de las reacciones entre los gases ácidos y la amina hacia reactivos.



La corriente que sale del desorbedor C-102, la corriente 6, contiene la amina regenerada, o amina pobre, ya que los gases ácidos son desorbidos. Tiene un caudal de 0,146 kg/s, una temperatura de 106,5 °C y una presión de 1,2 bar. La bomba P-101 A/B hace que se aumente la presión hasta los 13 bar y la impulsa hasta el intercambiador E-101, en donde cede calor a la corriente de amina rica procedente del absorbedor, y se enfría hasta los 48 °C. No obstante esta temperatura no es todavía lo suficientemente baja para introducir la amina pobre en la parte superior del absorbedor, por lo que la corriente 8 se envía a otro intercambiador, el E-103, de donde saldrá la corriente 9, ya a 25 °C, al intercambiar calor con agua de refrigeración que pasa de 20 °C a 40 °C.

Los gases ácidos desorbidos en la columna C-102, salen a su vez a través de la corriente 10, con un caudal de 33,99 kg/h, a una temperatura de 30 °C, una presión de 13 bar y una composición de: CO₂ 32,1%, H₂O 0,1% y H₂S 67,8%. Por lo tanto se está perdiendo cierto caudal de agua a través de esta corriente. Este pequeño caudal, 0,016 kg/h, se introduce en el sistema en forma de vapor a 106,5 °C y 12 bar (las condiciones de operación de fondos del desorbedor C-102), por medio de la corriente 5.

6.2 Sección 200, sección de reacción química

El gas natural desulfurado entra a la sección por la corriente 11, con un caudal de 2,39 kg/s y una composición de: N₂ 1,0%, CO₂ 0,47%, CH₄ 95,0% y C₂+ 3,5%, a una temperatura de 25 °C y una presión de 13 bar.

La corriente de recirculación que se introduce en la sección, la corriente 40, tienen un caudal de 0,104 kg/s, una temperatura de 30 °C, una presión de 3,5 bar y una composición de: H₂ 63,06%, N₂ 1,34%, CO 3,47%, CO₂ 4,68%, CH₄ 20,40% y H₂O 7,06%. Se aumenta la presión de esta corriente en el compresor recíproco K-202, hasta alcanzar la presión de la

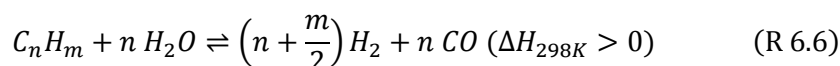
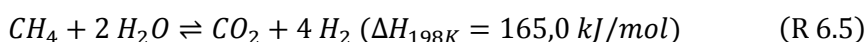
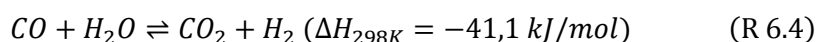
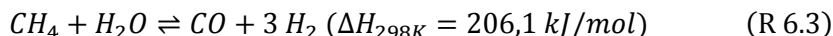
corriente de gas natural desulfurado. De este modo, la corriente de proceso pasa de 3,5 a 13 bar, aumentando su temperatura, como resultado de la compresión, de 30 a 41 °C.

Las corrientes 11 y 12 se mezclan, dando como resultado una corriente de 2,50 kg/s, 26 °C y 13 bar, la corriente 13. Es necesario aumentar la presión y la temperatura de esta corriente hasta alcanzar las condiciones de alimentación requeridas por el reformador R-201. Para ello se envía en primer lugar al compresor K-201, en donde se aumenta la presión de 13 a 19 bar, elevándose la temperatura de 26 a 61 °C. Es en este punto en donde se introduce el vapor de agua (corriente 15) necesario para que se produzcan las reacciones que tendrán lugar en el reformador R-201, con un caudal de 8,08 kg/s, a una temperatura de 250 °C y una presión de 19 bar. Al estar a una temperatura más elevada, ayudará a calentar la corriente 14.

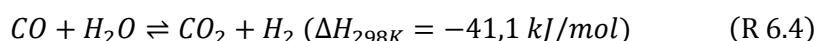
El resultado de mezclar las corrientes 14 y 15 es una corriente con un caudal de 10,58 kg/s, una temperatura de 199 °C, una presión de 19 bar y una composición de: H₂ 1,19%, N₂ 0,26%, CO 0,06%, CO₂ 0,20%, CH₄ 22,89%, C₂+ 0,83% y H₂O 74,56%, la corriente 16. Esta corriente es enviada al E-201, en donde se calienta de 199 °C a 477 °C, aprovechando los gases de combustión del reformador.

De este modo se obtiene la corriente 17, a 477 °C y 19 bar, que se enviará al reformador R-201. Esta temperatura no alcanza los 880°C, que es la necesaria para que se lleve a cabo la reacción, pero esto no es problema, ya que esta temperatura se alcanza posteriormente en el reformador.

En el reformador R-201 tienen lugar las reacciones de reformado con vapor, para producir hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono (R 6.3, R 6.4, R 6.5 y R 6.6). El conjunto de las reacciones es endotérmico y además es necesario aumentar aún más la temperatura, por lo tanto es necesario aportar del orden de $1,48 \cdot 10^8$ kJ/h (40,98 MW). El catalizador utilizado es níquel sobre soporte de alúmina. La corriente de salida del reformador, la corriente 18, tiene un caudal de 10,58 kg/h, y sale a una temperatura de 880 °C y a una presión de 17,3 bares, con una composición de: H₂ 50,62%, N₂ 0,18%, CO 10,28%, CO₂ 5,06%, CH₄ 1,96% y H₂O 31,90%.



Más adelante se dispone de dos reactores adiabáticos de lecho fijo, los reactores *shift* de alta (R-202) y de baja temperatura (R-203), con el objetivo de producir más hidrógeno y de consumir la máxima cantidad posible de CO. En el primer reactor se favorece la cinética de la reacción, trabajando aún a temperaturas altas, mientras que en el segundo, al trabajar a temperaturas menores, se favorece la termodinámica del proceso (ya que la reacción es exotérmica). De este modo se obtiene una conversión del 0,64 en el primer reactor y una conversión del 0,91 en el segundo. La reacción que tiene lugar en ambos reactores es la reacción exotérmica R 6.4.



Para alcanzar las condiciones de operación del reactor *shift* de alta temperatura R-202 es necesario disminuir la temperatura de la corriente de salida del reformador R-201 (corriente 18) de 880 °C a 376,2 °C mediante el intercambiador E-202, en donde se intercambia calor con vapor de agua, que pasa de 129,6 °C a 400,2 °C.

A la salida del reactor R-202 se obtiene una corriente con un caudal de 10,58 kg/s, a una temperatura de 450 °C, con una composición de: H₂ 57,20%, N₂ 0,18%, CO 3,70%, CO₂ 11,64%, CH₄ 1,96% y H₂O 25,32%. El catalizador utilizado en este reactor es de óxidos de hierro.

Esta corriente gaseosa de salida (corriente 20) se lleva hasta el intercambiador E-203, en donde se le baja la temperatura de 450 °C a 179,4 °C, intercambiando calor con vapor de agua, que se calienta de 129,6 °C a 440,0 °C. La corriente resultante, la corriente 21, se introduce en el reactor R-203. De este modo se obtiene que la salida del reactor *shift* de baja temperatura se encuentra a 220 °C, como resultado de la energía liberada por la reacción dentro del reactor adiabático. El catalizador utilizado en este reactor es de óxidos de cobre y de zinc. El caudal de la corriente de salida (corriente 22) es nuevamente de 10,58 kg/s, y en este caso se alcanza una composición de: H₂ 60,56%, N₂ 0,18%, CO 0,33%, CO₂ 15,00%, CH₄ 1,96% y H₂O 21,96%.

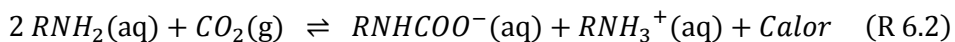
6.3 Sección 300, sección de separación y purificación

Los componentes resultantes de las reacciones químicas del proceso entran a la sección 300 por la corriente 22. La fracción molar de hidrógeno de esta corriente es aún muy baja y contiene demasiadas impurezas. Es por lo tanto necesario separarlas para obtener el producto deseado, hidrógeno del 99,9%. Para ello se emplean una serie de etapas de separación.

Se realiza primero la etapa de separación más sencilla, la separación del contenido de agua de la corriente, que además supone una fracción muy importante (21,96% en moles y 32,34% en masa). Para ello, la corriente 22 se envía al intercambiador E-301, enfriándose de 220 °C a 30 °C y condensando el vapor de agua contenido en la corriente, cediendo calor a una corriente de agua de refrigeración, que pasa de 20 °C a vapor sobrecalentado a 200 °C. La corriente resultante, la corriente 23, se envía al separador S-301, en donde se eliminará el agua que ha condensado. Este agua sale por la corriente 24, con algo de CO₂ disuelto, con un caudal de 3,33 kg/s y una composición de: CO₂ 0,15% y H₂O 99,85%. La corriente gaseosa de salida del separador S-301, la corriente 25, sale a 30 °C, 16 bar, con un caudal de 7,25 kg/s y una composición de H₂ 76,97%, N₂ 0,23%, CO 0,42%, CO₂ 19,02%, CH₄ 2,49% y H₂O 0,86%. Esta es la corriente con la que se alimentará a la columna de absorción C-301, pero para alcanzar las condiciones de operación de la misma es necesario aumentar la presión. Por lo tanto, la corriente 25 se envía al compresor K-301, en donde se aumentará la presión de 16 bar a 20,3 bares (20 atm). Como resultado de la compresión, la temperatura aumenta de 30 °C a 53 °C. De este modo, es necesario enfriar la corriente 26 de 53 °C a, de nuevo, 30 °C. Esto se hace mediante el intercambiador E-302, cediendo calor a una corriente de agua de refrigeración, que pasa de 20,0 °C a 40,0 °C. Así, se obtiene la corriente 27.

El absorbedor C-301 tiene como objetivo retirar la máxima cantidad de CO₂ posible de la corriente gaseosa, mediante un proceso de absorción con reacción química en amina, concretamente una disolución acuosa de MEA 2,5M. Este sistema de absorción tiene un funcionamiento similar al descrito en la sección 100. La corriente gaseosa con bajo contenido en CO₂, la corriente 37, sale por cabezas del absorbedor con un caudal de 1,72 kg/s, una temperatura de 30 °C y una presión de 20,2 bar (según lo especificado en el Anexo II, relativo a los balances de energía, y en la parte C del Anexo III, relativa al diseño del absorbedor), y una composición de: H₂ 94,39%, N₂ 0,28%, CO 0,52%, CO₂ 0,70%, CH₄ 3,05% y H₂O 1,06%. Para ello se introduce la corriente de amina pobre por la parte superior de la columna (corriente 34), con un caudal de 207,9 kg/s a 30°C y 20,3 bar. Por la corriente 28 sale la amina rica con el CO₂ absorbido, a 43,4 °C, a causa del calor liberado durante el proceso de absorción, con un caudal de 213,4 kg/s y a una presión de 20,3 bares.

La corriente de amina rica se tiene que introducir en el desorbedor C-302, para separar definitivamente el CO₂ retirado de la corriente gaseosa y de este modo regenerar la amina, en un proceso similar al del desorbedor C-102. Para ello es necesario reducir la presión y aumentar la temperatura de la corriente 28, con el fin de disminuir la solubilidad de los gases y de desplazar la reacción entre el CO₂ y la amina hacia reactivos, de acuerdo con el equilibrio planteado en la reacción R 6.2.



Por lo tanto, se envía la corriente 28 al intercambiador E-303 A/B, en donde intercambiará calor con la corriente de amina pobre (corriente 32) que está a mayor temperatura. De este modo la corriente 28 se calentará de los 43,4 °C a 103 °C. Por otra parte, la amina pobre de la corriente 32 se enfriará de 116,6 °C a 56,3 °C.

La corriente 29, de salida del E-303 A/B se envía hasta la válvula de estrangulamiento V-301, disminuyendo su presión de 20,3 a 1,4 bar. Como resultado, se obtiene la corriente 30, a una temperatura de 103 °C y una presión de 1,4 bar, que se alimentará al desorbedor C-302.

La amina regenerada sale por la corriente 31, con el máximo contenido posible de CO₂ eliminado, con un caudal de 207,9 kg/s, una temperatura de 116,6 °C y una presión de 1,6 bar. Para devolver esta corriente al absorbedor C-301 es necesario aumentar la presión y disminuir la temperatura, al contrario de lo que sucedía en la operación de desorción, para favorecer la solubilidad de los gases y desplazar el equilibrio planteado en la reacción R 6.2 hacia productos. Para ello se envía la corriente 31 a la bomba P-301 A/B, en donde se aumentará la presión de 1,6 a 20,3 bares. La corriente resultante, la corriente 32, se impulsa hasta el intercambiador E-303 A/B, intercambiando calor con la anteriormente mencionada corriente 28 (de amina rica), pasando de 116,6 °C a 56,3 °C. Sin embargo esta temperatura todavía no es lo suficientemente baja como para introducir esta corriente como alimentación líquida por la parte superior del absorbedor C-301. Por lo tanto, es necesaria una etapa de enfriamiento adicional, que tiene lugar en el intercambiador E-305, enfriándose de 56,3 °C a 30 °C, obteniéndose la corriente 34, que ya se puede alimentar por cabezas al absorbedor C-301.

En cuanto al CO₂ desorbido, sale del sistema por la corriente 35, con un caudal de 5,5 kg/s, a 32 °C y 14 bar, con una composición del 99,99% en CO₂. El 0,01% restante corresponde a la pequeña fracción de vapor de agua que no se consigue separa en el condensador. Aunque este caudal de agua es muy pequeño, es necesario introducir vapor de agua en el sistema para compensar las pérdidas. Este vapor se introduce por la parte baja del desorbedor C-302, por la corriente 36, con un caudal de 0,81 kg/h, a una temperatura de 116,6 °C y una presión de 1,6 bar.

La corriente gaseosa de salida del absorbedor, con bajo contenido en CO₂, la corriente 37, todavía tiene un contenido de impurezas importante. El % molar en H₂ es del 94,39%, y se pretende alcanzar una pureza del 99,99%, por lo que se introduce la corriente 37 en una última etapa de purificación, el sistema de PSA, constituido por una serie de lechos de adsorción que trabajan por ciclos. De este modo se obtienen dos corrientes de salida. Por un lado, la corriente 43, la corriente producto de H₂ al 99,9%, siendo el 0,1% restante N₂ que no fue adsorbido, con

un caudal de 0,96 kg/s, una temperatura de 30 °C y una presión de 20,2 bar. Y por otro lado, se obtiene una corriente de gases residuales que no son adsorbidos por los lechos del PSA, la corriente 38. Esta corriente presenta un caudal de 0,76 kg/s, una temperatura de 30 °C, una presión de 3,5 bar, y una composición de: H₂ 63,06%, N₂ 1,34%, CO 3,47%, CO₂ 4,68%, CH₄ 20,397% y H₂O 7,06%.

Esta corriente presenta un contenido importante de materia prima sin reaccionar (CH₄) y de H₂, que también es necesario introducir en el sistema antes del reformador, asegurando siempre un cierto contenido en hidrógeno en el sistema. De este modo, la corriente 40, parte de la corriente 38, se recircula a la sección 200, manteniendo constante la relación entre el hidrógeno que se recircula y el gas natural que se alimenta. Es necesario garantizar siempre este contenido en hidrógeno, de forma que se protejan los catalizadores del envenenamiento, y se prevenga la posible formación de restos de carbono. El caudal de *fuel gas* que no se recircula sale por la corriente 39 como subproducto del proceso, con un caudal de 0,66 kg/h. Esta corriente se utilizará como aporte de combustible al reformador.

6.4 Servicios auxiliares

En la planta será necesario utilizar dos servicios auxiliares, que se emplearán en todas las secciones: agua de refrigeración y vapor de agua.

- **Agua de refrigeración:** el sistema de agua de refrigeración se emplea en la planta en los intercambiadores de calor en los que se necesite refrigerar una corriente, excepto en aquellos en los que se intercambia calor entre dos corrientes de proceso o con vapor de agua. El sistema de agua de refrigeración maneja un caudal de 1172 m³/h, que se distribuyen conforme a lo especificado en la Tabla 10.

Se dispondrá de un sistema de refrigeración de agua, de modo que se recircule el agua resultante de los intercambios energéticos devolviéndola a una temperatura de 20 °C. De este modo, gran parte del caudal total, 1157 m³/h, se harán circular en circuito cerrado; de forma que solo se necesita aportar 15 m³/h de agua fresca (a partir de los cuales se generará vapor de agua a 200°C), además de lo que sea necesario aportar para compensar las pérdidas por evaporización que se produzcan en el sistema de refrigeración de agua.

- **Vapor de agua:** el sistema de vapor de agua de la planta se emplea tanto para calentar como para disminuir la temperatura de algunas corrientes de proceso. Se dispone de un circuito cerrado que engloba a los intercambiadores de calor E-102, E-202, E-203 y E-304, de modo que se reduce en gran medida el calor necesario

para mantener en funcionamiento el sistema de vapor de agua de la planta. Esto resultan en un considerable ahorro energético, siendo además innecesario aportar agua constantemente. El circuito de vapor de agua maneja un caudal de 145,3 t/h. El caudal de vapor de agua se distribuye entre los diferentes intercambiadores como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10. Distribución de los requerimientos de agua de refrigeración y vapor de agua

Intercambiador	Agua de refrigeración (kg/s)	Vapor de agua (kg/s)
E-101	-	-
E-102	-	0,17
E-103	0,19	-
E-104	0,11	-
E-201	-	-
E-202	-	27,83
E-203	-	12,36
E-301	4,19	-
E-302	5,73	-
E-303 A/B	-	-
E-304	-	40,36
E-305	288,27	-
E-306	27,11	-

Los intercambiadores a los cuales no se les asigna ningún requerimiento de utilidades consisten en intercambiadores en los que se intercambia calor entre corrientes de proceso (E-101 y E-303 A/B) o con los gases producto de la combustión del reformador (E-201), con el consiguiente ahorro energético que esto conlleva.

7. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

En el presente apartado se realizará una descripción general de los principales equipos de la planta, aportando los principales parámetros de los mismos. No obstante, se presta especial atención a aquellos equipos diseñados completamente (R-201 y C-301), de los cuales se aportará información en mayor detalle. Asimismo, se realizará una descripción más detallada del sistema PSA, debido a que su funcionamiento presenta una mayor complejidad que la mayoría de equipos y es de vital importancia para obtener el H₂ producto con la pureza deseada.

7.1 Listado de equipos

En la Tabla 11 se muestran los equipos que forman la *Planta de producción de hidrógeno por reformado de gas natural*.

Tabla 11. Listado de equipos de la *Planta de producción de hidrógeno por reformado de gas natural*

Tipo de equipo	Nombre	Descripción
Columna de absorción	C-101	Absorción de H ₂ S y CO ₂
Intercambiador de calor	E-101	Intercambio de calor entre las aminas rica y pobre
Válvula de estrangulamiento	V-101	Disminución de la presión en la amina rica
Columna de desorción	C-102	Desorción de H ₂ S y CO ₂ y regeneración de la amina
Intercambiador de calor	E-102	Caldera de la columna de desorción C-102
Bomba	P-101 A/B	Aumento de la presión en la línea de amina pobre
Intercambiador de calor	E-103	Refrigeración de la amina pobre
Intercambiador de calor	E-104	Condensador de la columna de desorción C-102
Separador de condensados	S-101	Separación del agua condensada en el E-104
Compresor	K-201	Compresión del gas de salida de la columna C-101
Sec. de convección de R-201	E-201	Calentamiento de la alimentación al reformador R-201
Reactor	R-201	Reformador
Intercambiador de calor	E-202	Refrigeración de la alimentación al reactor R-202
Reactor	R-202	Reactor <i>shift</i> de alta temperatura
Intercambiador de calor	E-203	Refrigeración de la alimentación al reactor R-203
Reactor	R-203	Reactor <i>shift</i> de baja temperatura
Compresor	K-202	Compresión de la recirculación
Intercambiador de calor	E-301	Refrigeración de la salida del reactor R-203
Separador de condensados	S-301	Separación del agua condensada en el E-301
Compresor	K-301	Compresión de la alimentación al absorbedor C-301
Intercambiador de calor	E-302	Refrigeración de la alimentación al absorbedor C-301
Columna de absorción	C-301	Columna de absorción de CO ₂
Intercambiador de calor	E-303 A/B	Intercambio de calor entre las aminas rica y pobre
Válvula de estrangulamiento	V-301	Disminución de la presión en la amina rica
Columna de desorción	C-302	Desorción de CO ₂ y regeneración de la amina
Intercambiador de calor	E-304	Caldera de la columna de desorción C-302
Bomba	P-301 A/B	Aumento de la presión en la línea de amina pobre
Intercambiador de calor	E-305	Refrigeración de la amina pobre
Intercambiador de calor	E-306	Condensador de la columna de desorción C-302
Separador de condensados	S-302	Separación del agua condensada en el E-306
PSA	C-303/304/305/306	Separación y purificación de H ₂

7.2 Compresores

Un compresor es una máquina diseñada para elevar la presión de un fluido compresible (frente a las bombas para líquidos, fluidos prácticamente incompresibles). En el diagrama de flujo de presente proyecto se consideran tres compresores: el K-201, el K-202 y el K-301.

7.2.1 Selección del tipo de compresor

Existe una gran variedad de compresores, muchos de ellos se recogen en la Figura 25. No obstante, los usados mayoritariamente son los recíprocos, los centrífugos y los de flujo axial.

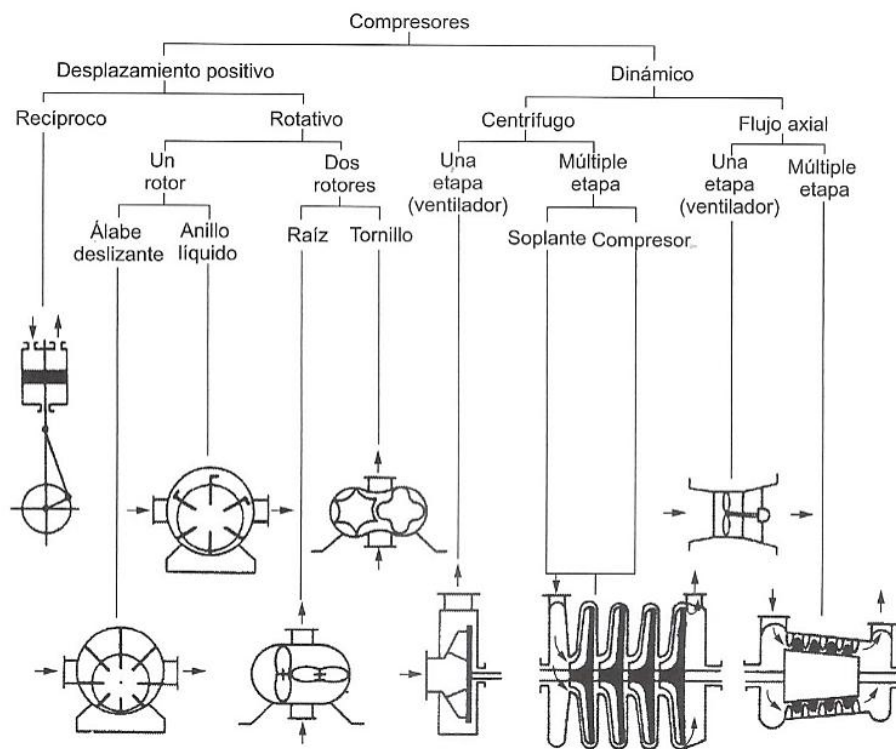


Figura 25. Tipos de compresores. Fuente: [38]

Debido a las condiciones de operación y los requerimientos de los compresores instalados en la planta, se tiene que todos ellos son centrífugos o recíprocos (o de pistón).

Se pueden fabricar en una gran variedad de materiales. Sin embargo, los materiales más utilizados en todo tipo de compresores son los aceros de baja aleación AISI 4140 y AISI 4340. No obstante, en este caso, sería más apropiado utilizar acero inoxidable AISI 410 (con un 12% de cromo), dado que es el material recomendado para gases con componentes corrosivos como el CO₂, y uno de los aceros inoxidables más comunes. [45]

7.2.2 Compresor K-201

El compresor K-201 presenta las características que se recogen en la Tabla 12.

Tabla 12. Características del compresor K-201

Tipo de compresor	Centrífugo
Número de etapas de compresión*	2
Número de carcasas*	1
Etapas de compresión por carcasa	2
Material de construcción	Acero inoxidable AISI 410
Caudal (kg/s)	2,496
Presión de entrada (bar)	13
Presión de salida (bar)	19
Temperatura de entrada (°C)	26
Temperatura de salida (°C)	61
Potencia* (kW)	201
Eficiencia* (%)	75
Velocidad de rotación del eje motor* (rpm)	20560

* Datos obtenidos mediante la aplicación [en línea] para el cálculo de compresores centrífugos [46].

7.2.3 Compresor K-202

El compresor K-202 presenta las características recogidas en la Tabla 13.

Tabla 13. Características del compresor K-202

Tipo de compresor	Recíproco
Número de etapas de compresión	1
Material de construcción	Acero inoxidable AISI 410
Caudal (kg/s)	0,104
Presión de entrada (bar)	3,5
Presión de salida (bar)	13
Temperatura de entrada (°C)	30
Temperatura de salida (°C)	41
Potencia (kW)	1,5
Eficiencia (%)	87

7.2.4 Compresor K-301

El compresor K-201 presenta las características que se recogen en la Tabla 14.

Tabla 14. Características del compresor K-301

Tipo de compresor	Centrífugo
Número de etapas de compresión*	2
Número de carcassas*	1
Etapas de compresión por carcasa	2
Material de construcción	Acero inoxidable AISI 410
Caudal (kg/s)	7,250
Presión de entrada (bar)	16
Presión de salida (bar)	20,265
Temperatura de entrada (°C)	30
Temperatura de salida (°C)	53
Potencia* (kW)	626
Eficiencia* (%)	83
Velocidad de rotación del eje motor* (rpm)	20560

* Datos obtenidos mediante la aplicación [en línea] para el cálculo de compresores centrífugos [46].

7.3 Bombas

Las bombas son dispositivos mecánicos que fuerzan a un líquido (fluidos prácticamente incompresibles) a desplazarse de un punto a otro. Existen numerosos tipos de bombas, clasificándose en recíprocas (de pistón y de diafragma), rotatorias, centrífugas... En el diagrama de flujo de presente proyecto se consideran dos bombas: la P-101 A/B y la P-301 A/B.

Estas bombas suministran la alimentación de amina pobre a las columnas de absorción C-101 y C-301, por lo tanto, estarán fabricadas en los mismos materiales que las columnas, es decir, en un acero inoxidable capaz de resistir los efectos corrosivos de la disolución de MEA al 15% en peso. Concretamente se utiliza el acero inoxidable de grado 347 (18Cr, 10Ni, Nb), uno de los aceros inoxidables más utilizados en las industrias de procesos. [38]

7.3.1 Bomba P-101 A/B

En este equipo se necesita impulsar 0,52 m³/h de disolución de MEA del 15% en peso, a una presión de salida de 13 bares (133 m de agua). Para ello se emplea el modelo de bomba centrífuga HP10G de la casa comercial Sta-Rite, seleccionada mediante el software de selección de bombas de la página web de Pentair. [47]

Como se dijo anteriormente, está fabricada en acero inoxidable de grado 347 (18Cr, 10Ni, Nb).

Las principales características de la bomba se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Características de la bomba P-101 A/B

Tipo de bomba	Bomba centrífuga
Modelo	HP10G
Número de etapas	1
Material de construcción	Acero inoxidable AISI 347
Caudal (m ³ /h)	0,524
Presión de entrada (bar)	1,2
Presión de salida (bar)	13
Potencia consumida (kW)	0,25
Velocidad de rotación del eje motor* (rpm)	2875
Diámetro del impulsor* (mm)	78,2

* Datos obtenidos mediante la aplicación [en línea] para la selección de bombas [47].

7.3.2 Bomba P-301 A/B

Se necesitan bombear 7500 m³/h de disolución de MEA del 15% en peso, a una presión de salida de 20,3 bares (aproximadamente 207 m de agua). Para ello se emplea el modelo de bomba centrífuga LPN ISO 13709/API 610 (BB1) de la casa comercial Flowserve. [48]

Está fabricada en el mismo material que las columnas, en acero inoxidable de grado 347 (18Cr, 10Ni, Nb).

Las principales características de la bomba se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Características de la bomba P-301 A/B

Tipo de bomba	Bomba centrífuga
Modelo	LPN ISO 13709/API 610 (BB1)
Número de etapas	1
Material de construcción	Acero inoxidable AISI 347
Caudal (m ³ /h)	7484
Presión de entrada (bar)	1,6
Presión de salida (bar)	20,26
Potencia consumida (kW)	567,8

7.4 Intercambiadores de calor

A continuación se presenta un resumen de los diferentes intercambiadores de calor de la planta. En el Anexo II, relativo a los balances de energía, se recogen detalladamente los cálculos de los calores intercambiados y de las diferentes temperaturas de entrada y salida de las corrientes de proceso.

7.4.1 Intercambiador de calor E-101

El intercambiador de calor E-101 se utiliza para enfriar la corriente de amina pobre procedente del desorbedor C-102 (previamente impulsada por la bomba P-101 A/B), de 106,5 °C a 48,0 °C. El enfriamiento se lleva a cabo mediante integración energética, calentando, de 43,2 °C a 101,5 °C, la corriente de amina rica que sale por la parte inferior del absorbedor C-101. Ambos fluidos circulan en contracorriente.

Se trata de un intercambiador de carcasa y tubos de acero inoxidable, capaz de resistir la corrosión que ofrecen los diferentes materiales que circulan a través del mismo.

Tabla 17. Intercambiador E-101

Fluido caliente	Disolución ácida
Fluido frío	Disolución ácida
Caudal fluido caliente (kg/s)	0,15
Caudal fluido frío (kg/s)	0,15
Calor intercambiado, Q (kW)	43,94
Coeficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	1500
ΔT_{mlog} (°C)	4,9
Área (m ²)	5,98

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.2 Intercambiador de calor E-102

Se trata de la caldera acoplada a la parte inferior de la columna de desorción C-102. A través de los tubos de la caldera circula vapor de agua, cediendo calor y enfriándose, consecuentemente de 129,6 °C a 108,0 °C. Por carcasa circula la disolución de amina pobre procedente de la columna de desorción C-102, evaporándose parcialmente y retornando a dicha columna. La disolución de amina resultante sale de la caldera a una temperatura de 106,5 °C.

Se trata también de un equipo fabricado en acero inoxidable.

Tabla 18. Intercambiador E-102

Fluido caliente	Vapor de agua
Fluido frío	Disolución ácida
Caudal fluido caliente (kg/s)	0,17
Caudal fluido frío de salida de la caldera (kg/s)	0,15
Calor intercambiado, Q (kW)	7,42
Coeficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	1700
ΔT_{mlog} (°C)	4,0
Área (m ²)	1,09

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.3 Intercambiador de calor E-103

Se trata de un intercambiador de calor de carcasa y tubos, fabricado en acero inoxidable. Este equipo es necesario para enfriar más la corriente de amina pobre que se tiene que introducir en la columna de absorción C-101, dado que mediante el enfriamiento producido en el

intercambiador E-101 no se consigue alcanzar la temperatura de operación requerida en la parte superior de la columna. De este modo, la disolución de MEA se enfría de 48,0 °C a 25,0 °C; mediante agua de refrigeración, que pasa de 20,0 °C a 40,0 °C, circulando en contracorriente.

Tabla 19. Intercambiador E-103

Fluido caliente	Disolución ácida
Fluido frío	Agua de refrigeración
Caudal fluido caliente (kg/s)	0,15
Caudal fluido frío (kg/s)	0,19
Calor intercambiado, Q (kW)	16,05
Coeficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	1500
ΔT_{mlog} (°C)	21,5
Área (m ²)	0,50

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.4 Intercambiador de calor E-104

Se trata del condensador parcial asociado a la columna de desorción C-102. Es un intercambiador de calor de carcasa y tubos, fabricado en acero inoxidable, capaz de resistir la corrosión que ofrecen el H₂S y el CO₂.

El objetivo de este equipo es el de condensar parcialmente la corriente que entrará en el separador bifásico S-101, para así obtener, por una parte los gases ácidos retirados del gas natural de alimentación al proceso, y por otra los condensados, que se recirculan al desorbedor C-102. Para ello es necesario disminuir la temperatura hasta los 30 °C, para lo cual se emplea como fluido refrigerante agua de refrigeración, entrando a 20 °C y saliendo a 28,9 °C.

Tabla 20. Intercambiador E-104

Fluido caliente	Disolución ácida
Fluido frío	Agua de refrigeración
Caudal fluido caliente (kg/s)	0,01
Caudal fluido frío (kg/s)	0,11
Calor intercambiado, Q (kW)	4,10
Coeficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	1700
ΔT_{mlog} (°C)	30,0
Área (m ²)	0,08

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.5 Intercambiador de calor E-201

No se trata de un intercambiador de calor propiamente dicho, sino que se trata de la sección de convección del reformador R-201, en dónde el fluido de proceso, que circula por tubos, se calienta mediante los gases producto de la combustión hasta alcanzar la temperatura de entrada a la sección de reacción del reformador. De este modo, el fluido de proceso entra a 198,9 °C y sale a 477 °C. Los tubos están fabricados en acero al carbono, debido a que no se transportan productos corrosivos y la temperatura de diseño no excede los 540 °C. [50]

7.4.6 Intercambiador de calor E-202

Consiste en un intercambiador de calor de carcasa y tubos. Su objetivo es enfriar la corriente de salida del reformador, de modo que se pueda introducir al reactor *shift* de alta temperatura (HTS), R-202. La temperatura de entrada al R-202 se fija de tal modo que la temperatura de salida del mismo sea de 450 °C, como se especifica en el Anexo II, correspondiente a los balances de energía. Por lo tanto, el fluido de proceso pasa de 880 a 376,2 °C, para lo cual se emplea como fluido refrigerante vapor de agua a menor temperatura, circulando en contracorriente, entrando a 129,6 °C y saliendo a 400,2 °C.

Está fabricado en acero inoxidable dado que tiene que ser capaz de resistir los efectos corrosivos de los productos generados en el reformador, que salen además a temperaturas muy elevadas.

Tabla 21. Intercambiador E-202

Fluido caliente	Corriente gaseosa de proceso
Fluido frío	Vapor de agua
Caudal fluido caliente (kg/s)	10,58
Caudal fluido frío (kg/s)	27,83
Calor intercambiado, Q (kW)	15469
Coeficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	200
ΔT_{mlog} (°C)	300
Área (m ²)	257,8

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.7 Intercambiador de calor E-203

Se trata nuevamente de un intercambiador de calor de carcasa y tubos de acero inoxidable.

El objetivo de este equipo es el de reducir la temperatura de salida del HTS, adaptándola a la temperatura de alimentación del reactor *shift* de baja temperatura (LTS), R-203, de modo que, como se indica en el Anexo II, relativo a los balances de energía, la temperatura de salida del mismo sea de 220 °C. De este modo, el fluido de proceso se enfría en el E-203 de 450 a 179,4 °C, mediante vapor de agua en contracorriente a menor temperatura como fluido refrigerante, entrando a 129,6 °C y saliendo a 440,0 °C.

Tabla 22. Intercambiador E-203

Fluido caliente	Corriente gaseosa de proceso
Fluido frío	Vapor de agua
Caudal fluido caliente (kg/s)	10,58
Caudal fluido frío (kg/s)	12,36
Calor intercambiado, Q (kW)	7883
Coeficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	200
ΔT_{mlog} (°C)	292,8
Área (m ²)	134,6

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.8 Intercambiador de calor E-301

Consiste en un intercambiador de calor de carcasa y tubos, fabricado en acero inoxidable. Es el primer elemento de la Sección de separación y purificación o Sección 300. Se emplea por lo tanto para retirar el calor necesario a la corriente de proceso, de modo que el vapor de agua que contiene, en una proporción bastante elevada, condense, y pueda ser separado fácilmente en una etapa posterior, en el separador bifásico S-301. De este modo, el fluido de proceso pasa de 220 °C a 30 °C, al intercambiar calor en contracorriente con agua de refrigeración a 20,0 °C que pasa a vapor sobrecalentado a 200,0 °C.

Tabla 23. Intercambiador E-301

Fluido caliente	Corriente gaseosa de proceso
Fluido frío	Agua de refrigeración
Caudal fluido caliente (kg/s)	10,58
Caudal fluido frío (kg/s)	4,19
Calor intercambiado, Q (kW)	11722
Coefficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	500
ΔT_{mlog} (°C)	67,5
Área (m ²)	347,4

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.9 Intercambiador de calor E-302

El intercambiador de calor E-302 se emplea para disminuir la temperatura de la corriente de proceso a la salida del compresor K-301, devolviéndola a los 30 °C, desde los 53 °C a los que ascendió como resultado de la compresión. Para retirar este calor se emplea agua de refrigeración, que pasa de 20,0 °C a 40,0 °C. Es necesario disminuir la temperatura para adecuar la corriente de proceso a las condiciones de operación de la columna de absorción C-301.

Se trata de un intercambiador de calor de carcasa y tubos, fabricado en acero inoxidable, en el que los fluidos circulan de nuevo en contracorriente.

Tabla 24. Intercambiador E-302

Fluido caliente	Corriente gaseosa de proceso
Fluido frío	Agua de refrigeración
Caudal fluido caliente (kg/s)	7,25
Caudal fluido frío (kg/s)	5,73
Calor intercambiado, Q (kW)	480
Coefficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	500
ΔT_{mlog} (°C)	21,5
Área (m ²)	44,7

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.10 Intercambiador de calor E-303 A/B

El intercambiador de calor E-303 A/B se utiliza para enfriar la corriente de amina pobre procedente del desorbedor C-302 (previamente impulsada por la bomba P-301 A/B), de 116,6 °C a 56,3 °C. El enfriamiento se lleva a cabo mediante una pequeña integración energética, calentando, de 43,4 °C a 103,0 °C, la corriente de amina rica que sale por la parte inferior del absorbedor C-301. Ambos fluidos circulan nuevamente en contracorriente.

Se trata de un intercambiador de carcasa y tubos de acero inoxidable, capaz de resistir la corrosión que ofrecen los diferentes materiales que circulan a través del mismo.

Tabla 25. Intercambiador E-303 A/B

Fluido caliente	Disolución ácida
Fluido frío	Disolución ácida
Caudal fluido caliente (kg/s)	207,9
Caudal fluido frío (kg/s)	213,4
Calor intercambiado, Q (kW)	63167
Coeficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	1500
ΔT_{mlog} (°C)	13,2
Área (m ²)	3190

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.11 Intercambiador de calor E-304

Se trata de la caldera acoplada a la parte inferior de la columna de desorción C-302. A través de los tubos de la caldera circula vapor de agua a alta temperatura, cediendo calor, y consecuentemente enfriándose de 476,0 °C a 129,6 °C. Por carcasa circula la disolución de amina pobre procedente de la columna de desorción C-102, evaporándose parcialmente y retornando a dicha columna. La disolución de amina resultante sale de la caldera a una temperatura de 116,6 °C.

Se trata también de un equipo fabricado en acero inoxidable.

Tabla 26. Intercambiador E-304

Fluido caliente	Vapor de agua
Fluido frío	Disolución ácida
Caudal fluido caliente (kg/s)	40,36
Caudal fluido frío de salida de la caldera (kg/s)	207,9
Calor intercambiado, Q (kW)	28722
Coeficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	1700
ΔT_{mlog} (°C)	63,4
Área (m ²)	266,6

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.12 Intercambiador de calor E-305

Se trata de un intercambiador de calor de carcasa y tubos, fabricado en acero inoxidable. Este equipo es necesario para enfriar más la corriente de amina pobre que se tiene que introducir en la columna de absorción C-301, dado que mediante el enfriamiento producido en el intercambiador E-303 no se consigue alcanzar la temperatura de operación requerida en la parte superior de la columna. De este modo, la disolución de MEA se enfría de 56,3 °C a 30 °C; mediante agua de refrigeración, en contracorriente, que pasa de 20,0 °C a 45,0 °C.

Tabla 27. Intercambiador E-305

Fluido caliente	Disolución ácida
Fluido frío	Agua de refrigeración
Caudal fluido caliente (kg/s)	207,9
Caudal fluido frío (kg/s)	288,3
Calor intercambiado, Q (kW)	30167
Coeficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	1500
ΔT_{mlog} (°C)	25,7
Área (m ²)	783,8

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.4.13 Intercambiador de calor E-306

Se trata del condensador parcial asociado a la columna de desorción C-302. Es un intercambiador de calor de carcasa y tubos, fabricado en acero inoxidable.

El objetivo de este equipo es el de condensar parcialmente la corriente que entrará en el separador bifásico S-302, para así obtener, por una parte, el CO₂ retirado de la corriente de proceso que se alimenta a la columna C-301, y por otra, los condensados, que se recirculan al desorbedor C-302. Para ello es necesario disminuir la temperatura hasta los 32 °C, para lo cual se emplea agua de refrigeración, entrando a 20,0 °C y saliendo a 40,0 °C. Ambos fluidos circulan, de nuevo, en contracorriente.

Tabla 28. Intercambiador E-306

Fluido caliente	Disolución ácida
Fluido frío	Agua de refrigeración
Caudal fluido caliente (kg/s)	6,28
Caudal fluido frío (kg/s)	27,1
Calor intercambiado, Q (kW)	2270
Coefficiente global de transmisión de calor, U (W/m ² K)*	1700
ΔT_{mlog} (°C)	40,3
Área (m ²)	33,2

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [49].

7.5 Reactores

7.5.1 Reformador R-201

El reformador es el principal equipo de transformación química dentro del proceso de reformado de gas natural con vapor de agua. Su objetivo es convertir los hidrocarburos ligeros presentes en el gas natural, principalmente metano, en hidrógeno.

En la Figura 26 se muestra la estructura general de un reformador.

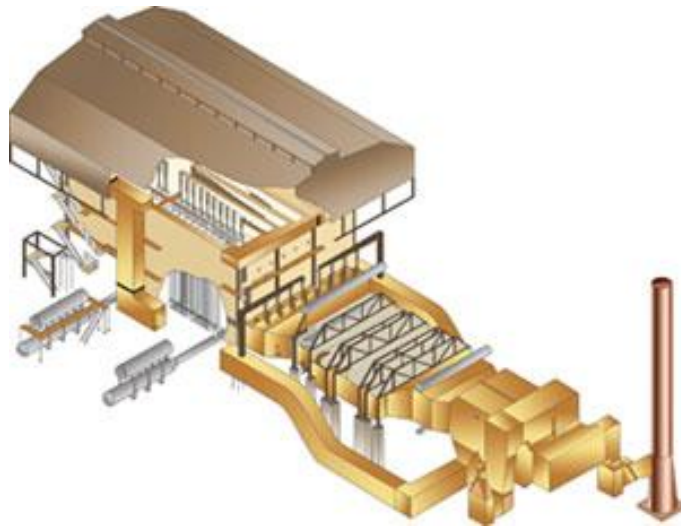
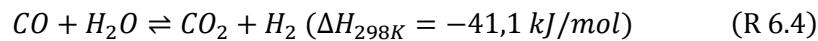


Figura 26. Vista general de un reformador. Fuente: [51]

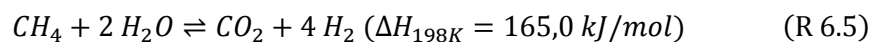
7.5.1.1 Esquema de reacción

Las principales reacciones de consumo de metano que tienen lugar en este equipo son:
[31]



Donde la reacción R 6.3 es la llamada reacción de reformado de metano y la R 6.4 *water gas shift*. [31]

Además de ello, se puede definir una nueva reacción (R 6.4), la denominada reformado total de metano o *overall steam reforming*. [31]



Esta reacción es la suma de las dos anteriores y su importancia deriva del mecanismo de reacción. Los autores Xu y Froment estudiaron las posibles rutas de reacción del reformado de metano y llegaron a la conclusión que se fundamenta en estas tres reacciones, las cuales se pueden representar de forma esquemática como se muestra en la Figura 27. [52]

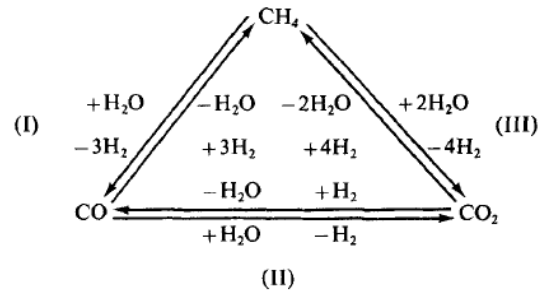
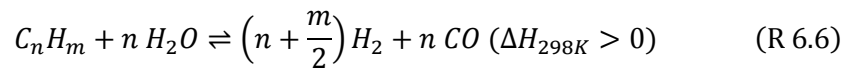


Figura 27. Esquema de reacción del reformado de metano. Fuente: [52]

En el gas natural existen otros compuestos de carbono de mayor peso molecular que el metano y que también sufren una transformación química produciendo hidrógeno. De forma general, el reformado de hidrocarburos se puede expresar como: [32]



Las principales características de las reacciones que tienen lugar en el reformador R-201 se listan a continuación:

- Salvo la reacción R 6.4, las demás son reacciones endotérmicas y, en consecuencia, requieren aporte de calor.
- Son reacciones de equilibrio, con lo que son reversibles y existirá una conversión máxima en función de las condiciones de operación: temperatura, presión y concentración de especies.
- Para mejorar su cinética se emplea un catalizador sólido creando un sistema catalítico heterogéneo.

En consecuencia, para aumentar el grado de conversión y mejorar la cinética es necesario operar a la temperatura más alta permisible por los materiales que componen el reactor. Para mejorar la transferencia de calor el lecho se reparte en una serie de tubos colocados en paralelo con aporte de calor externo. Este calor proviene de la quema de gas natural junto con los gases residuales precedentes del PSA.

7.5.1.2 Catalizador

El catalizador está formado por níquel sobre un soporte de alúmina formando anillos *Raschig* de 16 mm de diámetro. En la Figura 28 se muestran ejemplos de diferentes tipos de catalizadores utilizados en los procesos de reformado.



Figura 28. Catalizadores utilizados en el proceso de obtención de reformado de metano. Fuente: [53]

Las principales características del catalizador se recogen en la Tabla 29.

Tabla 29. Características principales del catalizador. Fuente: [54, 55]

Parámetro	Símbolo	Valor
Porosidad del lecho	$\epsilon_c (m_{\text{gas}}^3/m_{\text{col}}^3)$	0,57
Porosidad de la partícula	$\epsilon_p (m_{\text{gas}}^3/m_{\text{poro}}^3)$	0,649
Densidad de la partícula	$\rho_p (kg_{\text{cat}}/m_{\text{cat}}^3)$	1274
Densidad del sólido	$\rho_s (kg_{\text{cat}}/m_{\text{cat}}^3)$	3630
Radio del poro	$R_{\text{poro}} (\text{nm})$	4,25
Radio de la partícula	$R_p (\text{m})$	0,008
Ratio área/volumen	$a_c (m^{-1})$	2500

Para proteger el catalizador de la formación de coque normalmente se opera con relaciones molares de $\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$ elevadas de 2.5 a 3.0. En el caso del presente trabajo, como se vio en apartados anteriores, se elige un valor de 3. [23]

Otros factores a tener en cuenta es su gran sensibilidad a compuestos de azufre como H_2S y mercaptanos. Normalmente, la cantidad de azufre que es capaz de tolerar no debe superar

5 ppm, dependiendo de las condiciones del reactor y del tipo de catalizador. Por ello, el gas natural se desulfura previamente en la Sección 100. [23]

7.5.1.3 Descripción del equipo

Los reformadores están formados por dos partes fundamentalmente: la zona de combustión que contiene los tubos cargados de catalizador y una sección convectiva, donde se precalienta la alimentación, la cual se denomina E-201. La temperatura de los gases de combustión puede alcanzar temperaturas superiores a 1000 K. [56]

A continuación se describen las dos secciones del mismo: [57]

- **Zona de combustión.** Consiste fundamentalmente en una cámara donde se colocan los tubos llenos de catalizador a través de los cuales circulará la corriente de proceso. El mecanismo por el cual se transfiere calor en esta sección es fundamentalmente por radiación, pero también se transfiere calor por convección desde los gases quemados hasta los tubos. La temperatura de dichos gases a la salida de la zona de combustión es muy alta, por lo que es necesario seguir aprovechando la energía contenida en los mismos. En esta sección es en donde se sitúan los quemadores, localizados en una u otra disposición en función del tipo de reformador.
- **Zona de convección.** Los gases de combustión, procedentes de la zona anterior, son enviados hasta la sección de convección del horno, circulando a alta velocidad, paralela o perpendicularmente a través de un haz de tubos. El mecanismo de transmisión de calor predominante en esta sección es la convección. Existe la posibilidad de que los tubos dispongan de aletas en la pared externa (dado que normalmente son los gases de combustión los que presentan una mayor resistencia a la transmisión de calor) para aumentar la superficie de intercambio calorífico.

Debido a que el proceso de reformado requiere niveles de temperatura elevados, los tubos que contienen el catalizador son colocados verticalmente en la sección de combustión del reformador. En cambio, se utiliza la sección de convección para precalentar la alimentación y producir el vapor sobrecalentado necesario dentro del reactor. Ambas secciones se encuentran comunicadas por tubos de extracción para los gases de combustión.

En la Figura 29 se pueden ver el interior de un reformador.

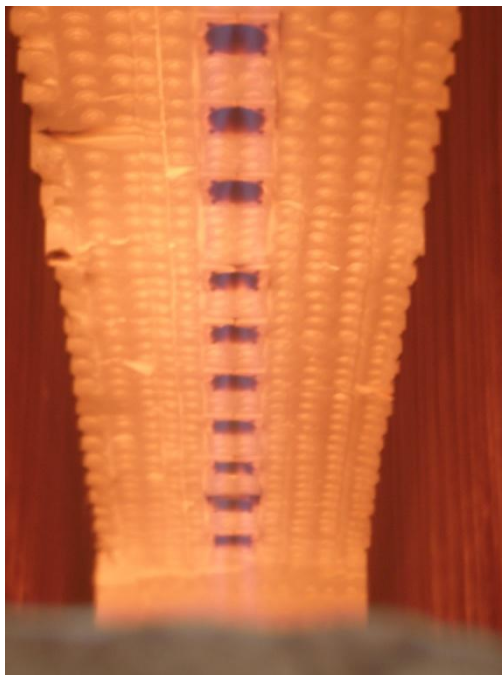


Figura 29. Interior de un reformador, tubos llenos de catalizador (en los laterales) y quemadores (parte central).
Fuente: [58]

Un factor importante a tener en cuenta es la necesidad de distribuir la alimentación de proceso en la entrada y recoger los gases producidos en salida obteniendo el mismo flujo en cada tubo aunque, a veces, no se produzca así. Cualquier diseño que utilice varios caminos paralelos requiere principal atención para asegurar que se logra el flujo deseado en cada tubo. Una buena distribución del gas natural alimentado depende de: [56]

- Todos los tubos deben tener la misma longitud y diámetro interno.
- El gas natural debe ser distribuido de forma equitativa en los tubos para conseguir una presión homogénea en la entrada de los mismos.
- El catalizador debe estar empacado de forma uniforme para proporcionar una caída de presión homogénea. Esto implica que la operación de carga del catalizador debe garantizar la suficiente uniformidad incluso durante numerosos ciclos de arranque y parada.
- El gas producido, principalmente hidrógeno, debe ser recogido de forma homogénea para que haya una presión uniforme en la zona de extracción.

La principal variable que depende del operador es la densidad del empacado de los tubos. Si la distribución de la caída de presión es desigual, el flujo de reactivos variará de unos tubos a otros y en consecuencia sus requerimientos de calor. Entonces, si el flujo de calor es

uniforme para todos ellos, los que presenten menor caudal se encontrarán a una temperatura mayor que los otros reduciendo su vida útil y el rendimiento global del reactor. [56]

Normalmente, los tubos empacados se colocan en una o varias filas con un mínimo ratio de espaciado de tubos (de centro a centro) entre su diámetro exterior o, por sus siglas, CCD. Este parámetro depende de la configuración del reformador.

Existen 4 configuraciones utilizadas en reformadores de alta capacidad: *Side-fired*, *top-fired*, *terraced-wall*, *bottom-fired*.

En los tipos *side-fired* y *terraced-wall* los quemadores son colocados a diferentes alturas a lo largo de las paredes laterales para minimizar la variación del flujo calorífico. Típicamente, los tubos presentan un valor de CCD entre 1,4 y 1,7 para obtener una distribución óptima de calor a lo largo de dichos tubos minimizando la existencia de picos en su perfil de temperatura.

Para las configuraciones *top-fired* y *bottom-fired* la distancia entre los tubos es diferente debido a que en estos casos, su perfil de temperaturas y el mecanismo de transferencia de calor dependen principalmente del espaciado entre quemadores, y no de la uniformidad del calentamiento de las paredes laterales. Generalmente, el espaciado entre tubos está entre 2 y 2,5. [59, 60]

En el caso del reformador del presente trabajo se elige la configuración *top-fired* que consta de una sección de combustión rectangular, mientras que la de convección será denominada como un intercambiador (E-201) que utiliza con los gases de combustión de la otra sección como fluido térmico.

A continuación, en la Figura 30 se puede ver esquemáticamente un reformador del tipo *top-fired*.

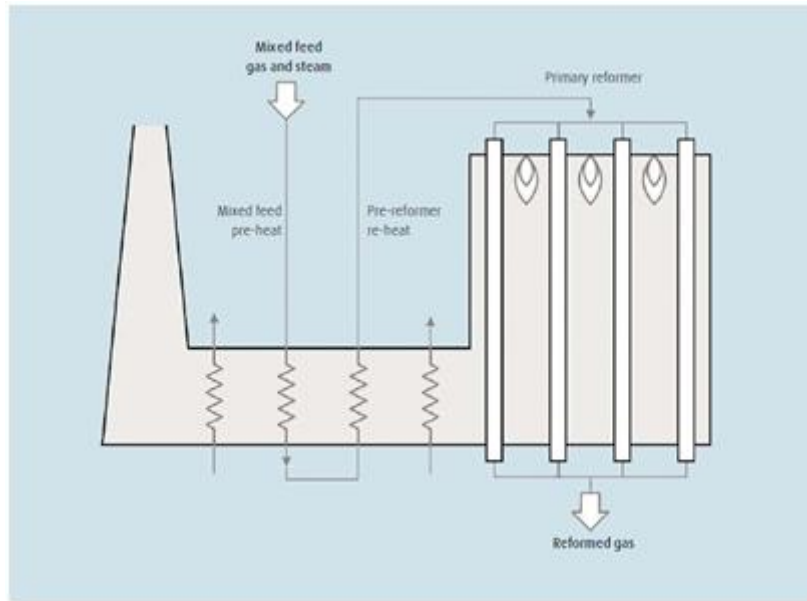


Figura 30. Reformador *top-fired*. Adaptado de [60]

Según datos bibliográficos, el lecho se suele repartir en tubos de entre 7,5 y 12 metros de largo y entre 7 y 13 cm de diámetro. Debido a la dependencia de la caída de presión y de la resistencia a la transmisión de calor con el diámetro de los tubos, se debe elegir un diámetro que optimice ambas variables. En la práctica, se sacrifica la caída de presión a favor de la transmisión de calor. Los tubos empleados en el presente reformador son de 10 metros de largo y 0,1 metros de diámetro. [56]

El lecho del presente reformador está repartido en 126 tubos, los cuales forman tres filas de 42 tubos, intercaladas con cuatro de 13 quemadores cada una. En consecuencia, las dimensiones de la zona de combustión son: 8 metros de ancho, 14 metros de largo y 10 metros de alto.

En la Figura 31 se muestra una representación tridimensional del interior de un reformador de configuración *top-fired*, donde los quemadores y tubos están colocados en filas alternadas. Los gases de combustión, todavía calientes, salen de la zona de combustión a través de túneles de extracción en la parte inferior.

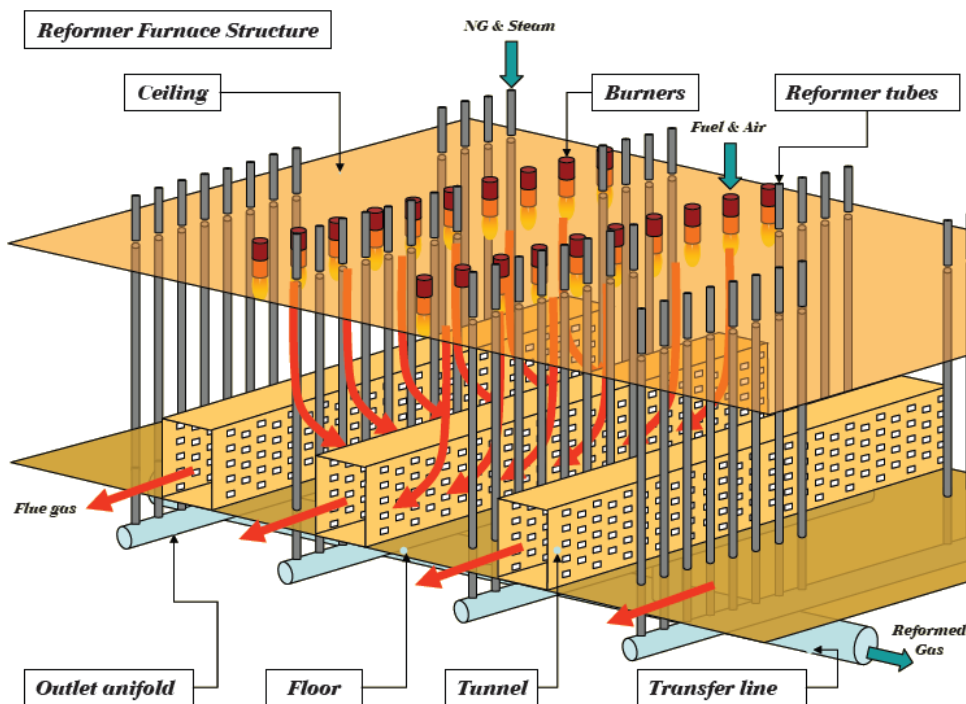


Figura 31. Representación tridimensional del interior un reformador *top-fired*. Fuente: [61]

La energía utilizada para calentar el reformador proviene de la combustión de una mezcla formada por gas natural y gases ricos en monóxido de carbono procedentes de la sección de purificación [62]. La cantidad de oxígeno empleada no es la estequiométrica, sino que se introduce un exceso de aire para asegurar la combustión completa del combustible. La cantidad en exceso viene determinada por el quemador, la temperatura a la cual entra el aire de combustión y sobre todo por el tipo de combustible. Esto se puede observar en la Tabla 30, en donde se muestra el exceso de aire en % sobre el estequiométrico para diferentes casos.

Tabla 30 . Exceso de aire en tanto por ciento sobre el estequiométrico. Fuente: [57]

Combustible	Aire frío (20°C)	Aire caliente (300°C)
Fuel oil	20-25	5-15
Gas	10-15	5-10

Se considera una presión en la cámara de combustión de 0,12MPa, donde la máxima temperatura que alcanzan los gases de combustión es de 950 °C. [63]

En cuanto a los materiales empleados en la construcción del reformador R-201 se tiene que tener en cuenta, por una parte, que los tubos empacados deben ser capaces de resistir las altas temperaturas a las que se encuentran. El acero convencional no posee las características

adecuadas, con lo que se elige una aleación de cromo y níquel con una composición de: Cr 24-28%, Ni 18-22%, C 0,35-0,45%, Mn 2%, Si 2 %, P 0,05% y S 0,05%. [56]

Por otro lado, las paredes de la zona de combustión deben ser capaces de soportar también dichas temperaturas y aislar lo mejor posible el exterior para minimizar las pérdidas de calor. Los materiales utilizados se pueden englobar en dos grupos principales: materiales aislantes que funcionan como recubrimiento interior y la carcasa y elementos de soporte hechos por un material metálico. Como recubrimiento se pueden emplear ladrillos, recubrimientos monolíticos y fibra cerámica. [64]

7.5.1.4 Características del reformador R-201

Las principales características del reformador se recogen en la Tabla 31.

Tabla 31. Características principales del reformador R-201

Características	Valor
Masa de catalizador	5400 kg
Volumen del reactor	9,857 m ³
Velocidad espacial	1224,4 l/h l _{cat}
Nº de tubos	126
Dimensiones de los tubos	10 m (largo) x 0,1 m (diámetro int.) x 0,022 m (espesor)
Dimensiones del reformador	8 m (ancho) x 14 m (largo) x 10 m (alto)
Nº de quemadores	52
Calor aportado	60 MW
Materiales de los tubos	AISI A 608 Grado HK40 (25Cr-20Ni)
Caída de presión en los tubos	0,206 MPa

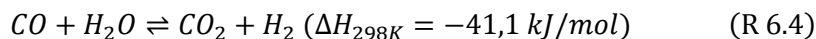
7.5.2 Reactores R-202 y R-203: HTS y LTS

Para eliminar la mayor parte del CO producido en el reformador R-201 y obtener un poco más de hidrógeno, se emplean dos reactores adiabáticos basados en la reacción *water gas shift* (WGS): reactor *shift* de alta temperatura (HTS) y reactor *shift* de baja temperatura (LTS).

El CO debe ser eliminado a toda costa porque puede generar problemas de envenenamiento en las posteriores aplicaciones del hidrógeno.

7.5.2.1 Esquema de reacción

La reacción que tiene lugar en estos equipos es la llamada *water gas shift* (WGS), la cual es:



Esta reacción es moderadamente exotérmica y su constante de equilibrio baja con el aumento de la temperatura. Por ello, las bajas temperaturas favorecen una alta conversión de CO. En cambio, como no existe variación en el número de moles, la presión no afecta al equilibrio. Existen convertidores industriales que trabajan a presiones de entre 3 a 40 bares, dependiendo de los requerimientos de presión del resto de unidades de la planta. [23]

En la Figura 32 se muestra la variación de la constante de equilibrio con la temperatura.

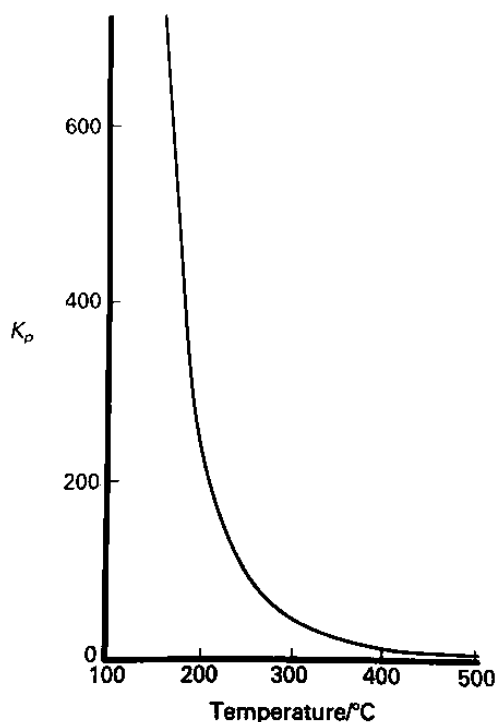


Figura 32. Variación de la constante de equilibrio (K_p) con la temperatura para la reacción WGS. Fuente: [56]

En consecuencia, si se quiere alcanzar el mayor grado de conversión posible se debe trabajar a temperaturas muy bajas, pero esto presenta el problema de que se reduce mucho la cinética de reacción.

La solución es utilizar dos lechos que trabajen a diferentes temperaturas, de tal forma que el primero favorezca más la cinética con temperaturas altas y el segundo trabaje a la temperatura menor posible para alcanzar el grado de conversión deseado.

7.5.2.2 Catalizador

Cada reactor utiliza catalizadores diferentes debido a que presentan requerimientos distintos. A continuación se describen las principales características de cada uno.

- **Catalizador del reactor HTS:** El catalizador empelado en este reactor se basa en óxidos de hierro en forma de pellets de varios tamaños, siendo los más comunes los de 6 x 6, 9 x 6 y 9 x 9 mm.

Normalmente contienen entre un 8 y un 12% en peso de Cr_2O_3 para evitar la sinterización del óxido de hierro por las altas temperaturas evitando que se pierda área superficial. Además, es posible adicionar otros óxidos como MgO y ZnO al catalizador para mejorar su selectividad con respecto a la formación de CH_4 , resistencia al azufre y resistencia mecánica.

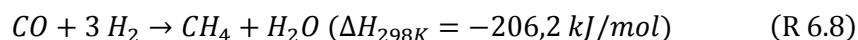
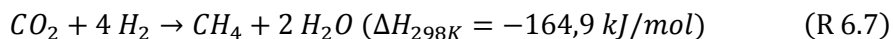
El área superficial que presenta habitualmente el catalizador de un reactor HTS alcanza valores de entre 30 y 80 m^2/g .

El proceso de obtención del catalizador de Fe-Cr se basa en la precipitación de FeSO_4 acuoso con hidróxido sódico en presencia de aire. Este sistema presenta el problema de que requiere un buen lavado posterior para eliminar los restos de azufre. Otra alternativa es mezclar mecánicamente óxido de hierro (precipitado con carbonato amónico) con ácido crómico para después recibir un tratamiento térmico. El resultado obtenido es $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, también llamado hemetita. En cualquier caso, para poder utilizarlo en la industria se transforma previamente en magnetita (Fe_3O_4) para una vez cargado el reactor reducirlo de nuevo a hemetita.

El catalizador no presenta soporte debido a que se ha demostrado que éstos reducen su actividad.

Normalmente, la vida útil de estos catalizadores es de 3 años, siendo una de las principales causas de su desactivación su sinterización con el paso del tiempo. En cambio, presenta una alta resistencia a compuestos azufrados, siendo capaz de soportar concentraciones de 100 ppm. [23]

- **Catalizador del reactor LTS:** La formulación del catalizador de este reactor es muy importante debido a factores de selectividad, envenenamiento y actividad. En las condiciones en las que opera son muy favorables las reacciones de metanación de CO_2 y de CO :



Estas reacciones consumen hidrógeno reduciendo su producción, además de crear un problema de seguridad por su elevado carácter exotérmico.

Un catalizador basado en cobre (CuO) presenta una buena actividad para la reacción WGS y ninguna para las reacciones de metanación. Sin embargo, tiene problemas de sinterización a temperaturas moderadas, por lo que sólo se emplea en reactores de temperatura relativamente baja. Otro factor a tener en cuenta es su baja resistencia al azufre.

El catalizador industrial está formado por una mezcla de óxidos de cobre y de cinc, el cual cuando es reducido forma cristales de cobre soportado sobre el óxido de cinc. Uno de los grandes problemas que presenta es su baja vida de operación debido a que estos cristales tienden a crecer por la sinterización reduciendo el área superficial. Una solución es añadir alúmina como soporte, la cual estabiliza el cobre reduciendo la sinterización y aumenta su resistencia mecánica.

El método de obtención del catalizador se basa en la precipitación de formulaciones con los óxidos de cobre, cinc y aluminio. El contenido de CuO debe estar entre un 30 y un 40% para maximizar su vida operativa.

Las propiedades típicas de un catalizador para un reactor LTS pueden ser: 5,4 x 3,6 mm de tamaño, 90 m²/g de área superficial y una composición de 32 % de CuO, 53 % de ZnO y 15 % de Al₂O₃. [56]

7.5.2.3 Descripción de los equipos

El primer reactor (HTS) normalmente opera en un rango de temperatura de entre 360 a 530 °C y el segundo (LTS) ente 210 y 270 °C. De esta manera se consigue aprovechar mejor el catalizador con una velocidad mayor de reacción y alcanzando la conversión requerida. A continuación se describen sus principales características. [23]

- **Reactor HTS:** Es el primer reactor de los dos dispuestos para eliminar el CO producido en el proceso de reformado en el reactor R-201. La temperatura de entrada a este equipo es de 376,2 °C y la de salida de 450 °C. El grado de conversión alcanzado es del 64 %. Como regla general, se puede indicar que para un grado de conversión del 1% en volumen de CO la temperatura del gas de síntesis aumenta en 10 °C. Normalmente, para este tipo de reactor, la velocidad espacial (caudal de gas de síntesis seco/volumen catalizador) presenta un valor entre 300 y 4000 l/h l_{cat}.

El catalizador empleado se basa en óxidos de hierro y de cromo. El catalizador debe tener cierta resistencia mecánica debido a que puede estar sometido a un estrés mecánico. Para ello se puede emplear un catalizador más resistente con volúmenes de poro menores, pero esto dificulta el acercamiento de los gases a los centros activos del catalizador. Diferentes estudios han demostrado que la difusión interna sigue limitando la conversión incluso con pellets de 3,6 x 5,4 mm de tamaño. Sin embargo, partículas tan pequeñas producen caídas de presión elevadas, con lo que se complica el diseño del reactor. [23]

- **Reactor LTS:** El segundo reactor opera a unas temperaturas menores, siendo su entrada a 179,4 °C y su salida a 220 °C. El grado de conversión alcanzado es del 91 %. Normalmente, su velocidad espacial se encuentra en el mismo rango que el HTS, siendo de entre 300 y 4000 l/h l_{cat} . La temperatura en el interior del reactor sube progresivamente a medida que se produce la transformación química y no puede exceder de valores cercanos a los 270 °C debido que se puede perder la actividad del catalizador.

El catalizador empleado se basa en cobre y cinc y puede presentarse en diferentes formas, siendo los más habituales pellets, esferas y extrusiones. Se prefieren partículas con áreas superficiales elevadas por presentar mayor capacidad de adsorción de venenos. Los sulfuros son capaces de bloquear poros, pero una vez que se formó un bloqueo en sus entradas, no puede ser adsorbido más cantidad de azufre en ellos. [23]

En la Figura 33 se muestran las partes típicas de un reactor *shift*.

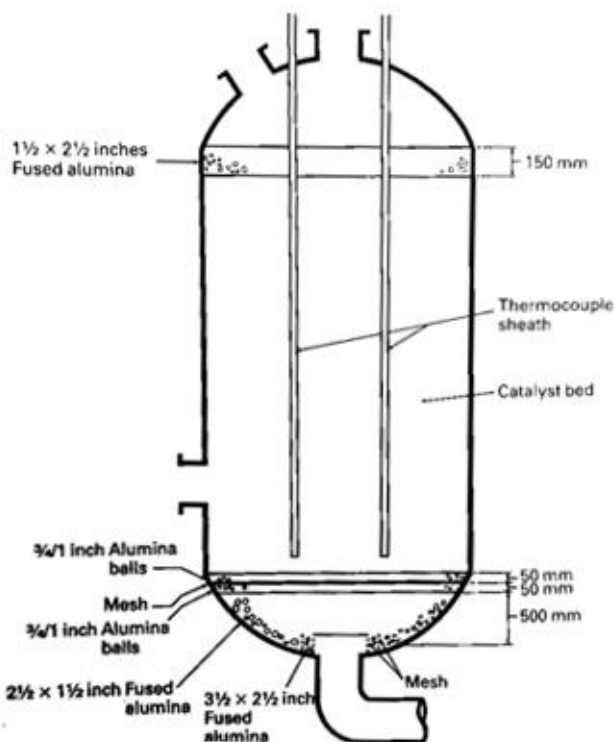


Figura 33. Disposición típica de un convertidor *shift*. Fuente: [56]

Al igual que para todos los reactores de lecho fijo, se pueden colocar agujeros de hombre para poder acceder al interior para inspecciones y una carga y descarga segura del catalizador.

En la entrada del reactor se debe colocar un distribuidor de gas que permita reducir al mínimo el espacio necesario sobre el catalizador y, en consecuencia, el reducir el volumen del recipiente. Además, es necesario asegurar que el gas de entrada no altere el lecho evitando que se produzca rozamiento entre las partículas del mismo causando una mayor caída de presión.

Es habitual colocar un plato perforado o una malla en la salida del reactor y un lecho de esferas de alúmina en el espacio superior en la entrada del mismo. A veces, se coloca otra malla formada por varios segmentos atornillados por encima de las esferas. Esta colocación evita el uso de estructuras de acero en la base del reactor y reduce el número de fijaciones interiores que, con el tiempo, sufren el riesgo de romper en puntos de elevada tensión.

Una vez que el catalizador ha sido cargado, se añade una capa adicional de alúmina fundida en forma de grumos, la cual puede ser cubierta por una malla o una rejilla. Esto no evita el desgaste del catalizador producido por una mala distribución del gas pero captura posibles sólidos procedentes de otras operaciones aguas arriba.

Dentro del lecho se colocan uno o dos termopares dentro de vainas para monitorizar los gradientes de temperatura durante la operación. No es imprescindible utilizar dos, pero tener dos perfiles de temperatura del interior del reactor puede proporcionar información muy útil. Por ejemplo, una diferencia entre ambos perfiles indicaría una mala distribución del gas en el lecho. [56]

En cuanto a los materiales de fabricación, se tratan de recipientes a presión, por lo que se aplica el estándar más ampliamente utilizado, el *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* (el código ASME BPV).

El material seleccionado debe ser capaz de resistir las altas presiones y temperaturas y un entorno ácido creado por la presencia de gases ácidos como el CO₂. Por ello, se considera que la mejor opción es el acero inoxidable AISI 347 (18 Cr, 10 Ni, Cb). [38]

7.6 Columnas de absorción y desorción

7.6.1 Columnas de relleno

Las columnas de relleno se utilizan tanto en operaciones de absorción y desorción como en destilación o extracción líquido-líquido. En ellas, el contacto entre fases es continuo, y no por fases, como en una columna de platos. El líquido desciende por la superficie del relleno de la columna y el gas o vapor asciende por la columna en contracorriente. El rendimiento de una columna de relleno depende en gran medida de que se mantenga una buena distribución del líquido y del gas a través del lecho del relleno. [38]

En la Figura 34 se muestra un diagrama esquemático con las principales características y componentes mínimos de una columna de absorción de relleno.

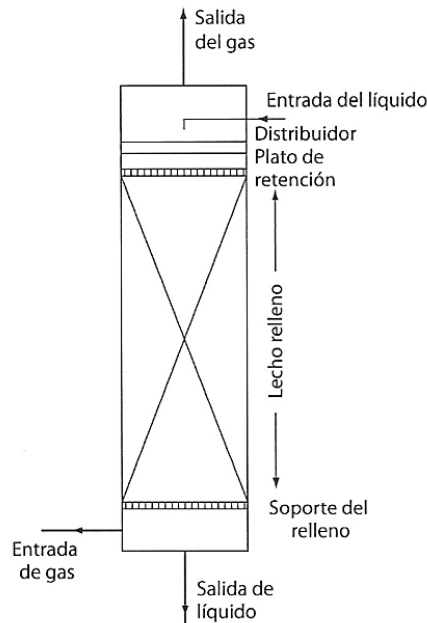


Figura 34. Columna de absorción de relleno. Fuente: [38]

7.6.2 Componentes internos de las columnas de relleno

Los accesorios internos en una columna de relleno son más sencillos que en las columnas de platos, pero se deben de diseñar cuidadosamente para asegurar un buen rendimiento. Los diferentes accesorios a considerar son:

7.6.2.1 Soporte del relleno

Este elemento tiene como función soportar el peso del relleno húmedo, mientras permite pasar libremente el gas y el líquido. Un soporte mal diseñado produciría una elevada caída de presión y podría provocar una inundación local. [38]

Existen dos tipos de soporte: en contracorriente; o con flujo separado o de “inyección de gas”, con dos pasos separados para los flujos de líquido y gas. [65]

Este último modelo es el que reúne mejores características para sostener el relleno. Estos diseños presentan una baja caída de presión y no tienden a inundarse. Además están disponibles en un amplio abanico de tamaños y materiales: metales, cerámicos y plásticos. El utilizado en el presente absorbedor será por lo tanto de material cerámico, al igual que el propio relleno, de forma que sea capaz de resistir la corrosión derivada de las sustancias que se manejan.

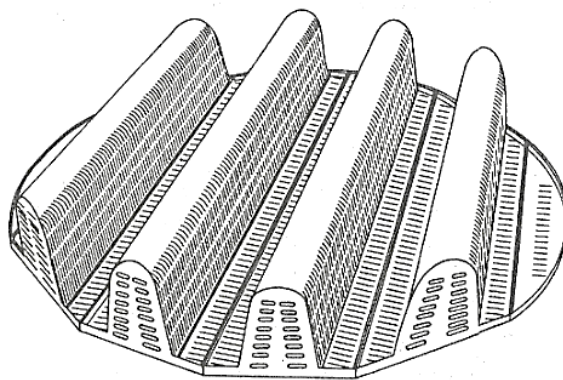


Figura 35. Soporte con flujo separado o de inyección de gas. Fuente: [65]

7.6.2.2 Distribuidores de líquido

La distribución uniforme del líquido en cabeza de la columna es esencial para que ésta funcione eficazmente. Para ello se pueden usar varios diseños de distribuidores, no obstante, los dos diseños más utilizados son el de tipo orificio, Figura 36, y el tipo rebosadero, Figura 37.

En el tipo orificio el líquido circula a través de los orificios y el gas a través de unos conductos cortos dispuestos verticalmente a través de los platos, también conocidos como chimeneas o elevadores de gas. Los elevadores de gas se deberían dimensionar de forma que ofrezcan un área suficiente como para que circule el gas sin crear una caída de presión significativa, mientras que los orificios para el líquido deberían ser lo suficientemente pequeños como para asegurar que siempre existe un cierto nivel de líquido en el plato, aún con el menor caudal de líquido al que se pueda operar, pero lo suficientemente grandes para prevenir el desbordamiento del distribuidor al mayor caudal. [38, 65]

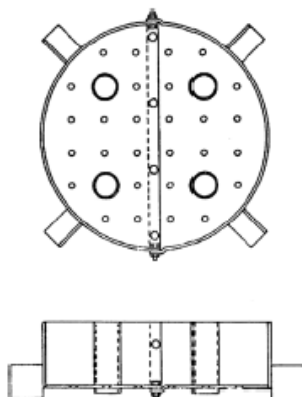


Figura 36. Distribuidor de tipo orificio. Fuente: [38]

El tipo rebosadero proporciona buena distribución en un intervalo de caudales de gas y de líquido más amplio que el tipo orificio, pero se trata de un distribuidor más complejo. El líquido puede fluir sobre sencillas esclusas con muescas en forma de V, o a través de tubos que extienden los rebosaderos hasta cerca del nivel superior del relleno. [38, 65]

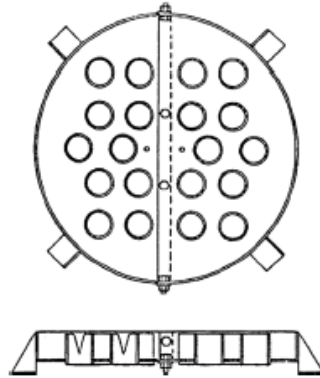


Figura 37. Distribuidor de tipo rebosadero. Fuente: [38]

Por otra parte, para columnas de gran diámetro, como el absorbedor C-301, se puede utilizar el distribuidor tipo abrevadero, mostrado en la Figura 38, con el cual se puede obtener una buena distribución de líquido, con una gran área libre para la circulación del gas.

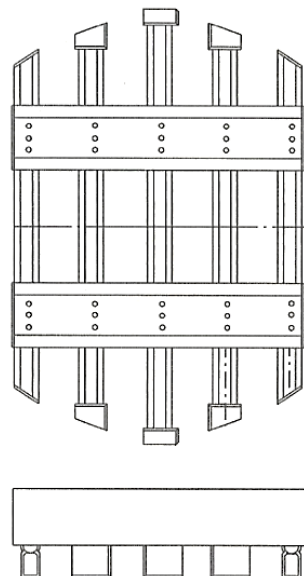


Figura 38. Distribuidor de tipo abrevadero. Fuente: [38]

Este último será el tipo de distribuidor seleccionado, que como los dos anteriores, se basa en la circulación del líquido por gravedad, por lo que se debe instalar en la columna totalmente derecha, o se producirá una mala distribución del líquido.

7.6.2.3 Redistribuidores del líquido

Estos elementos se utilizan para recoger el líquido que ha migrado a las paredes de la columna y lo redistribuye uniformemente sobre el relleno. Un redistribuidor completo combina las funciones de los dos elementos descritos anteriormente: el soporte del relleno y el distribuidor del líquido. En la Figura 39 se muestra un diseño típico, como el que se utiliza en el absorbedor C-301.

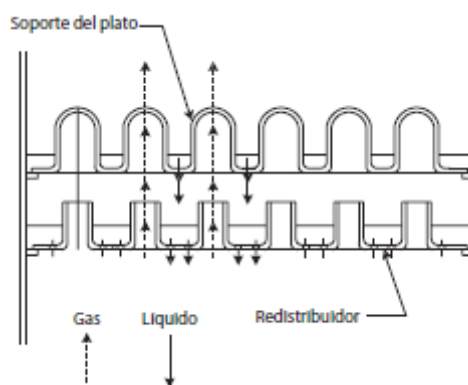


Figura 39. Redistribuidor de líquido. Fuente: [38]

La altura máxima que se debería usar sin redistribución del líquido dependerá del tipo de relleno y del proceso. No obstante, como guía general, y como primera aproximación, la altura máxima del lecho no debería exceder a tres veces el diámetro de la columna para anillos Raschig, que son los empleados en el absorbedor. O bien, por otro lado, en una columna de gran diámetro como el absorbedor C-301, esta altura máxima también estará limitada por el peso máximo del relleno que son capaces de aguantar, tanto los soportes como los redistribuidores, por lo que no se recomiendan alturas superiores a 8 metros. [38]

7.6.2.4 Platos de contención

A velocidades relativamente altas de gas, o si se produce un “pico” en el caudal debido a un mal funcionamiento, se pueden fluidizar las capas superiores del relleno o, en el caso de rellenos cerámicos, se pueden llegar a quebrar, y los pedazos filtrar por la columna y taponar el

relleno. Estos problemas se pueden solucionar mediante la instalación de este tipo de elementos. En la Figura 41 se muestra un diseño típico de platos de contención. [38]

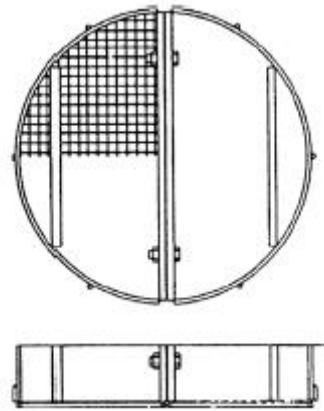


Figura 40. Platos de contención. Fuente: [38]

7.6.3 Absorbedor C-301

En esta columna se produce la absorción del CO_2 producido en las diferentes reacciones a lo largo de los reactores R-201, R-202 y R-203. En la Parte B del Anexo III, relativo a cálculos justificativos, se detalla de forma pormenorizada el cálculo de los diferentes parámetros de la columna. Los datos que se obtienen se muestran resumidos en la Tabla 32.

Tabla 32. Parámetros del absorbedor C-301

Parámetro	Valor
Altura del relleno (m)	23,69
Altura total del equipo (m)	29,08
Diámetro (m)	3,03
Tipo de relleno	Anillos Raschig cerámicos
Tamaño del relleno (in)	1½
Caída de presión (Pa)	6839
Espesor de carcasa (mm)	36,27
Espesor de cabezales (mm)	19,97
Material	Acero inoxidable de grado 347

Además consta de los accesorios internos recogidos en la Tabla 33.

Tabla 33. Accesorios internos de la columna de absorción C-301

Elemento	Tipo	Altura (m)
Soporte del relleno	Con flujo separado o de inyección de gas	-
Distribuidores de líquido	Abrevadero	0,51
Redistribuidores de líquido (x2)	Redistribuidor total	1,83
Platos de contención	Estándar	-

Asimismo se considera un espacio adicional en la parte superior del relleno de 1,22 m, y otro espacio adicional en la parte inferior de la columna de 1,83 m.

En cuanto al material de fabricación, los lechos de las columnas de relleno (C-101, C-102, C-301 y C-302) son de material cerámico, resistente a la corrosión.

Del mismo modo, la selección del material para la carcasa de la columna C-301 se realiza también conforme a lo detallado en el apartado correspondiente al diseño de dicho absorbedor, en el Anexo III. El material que se utiliza es un acero inoxidable capaz de resistir los efectos corrosivos, concretamente el acero inoxidable de grado 347 (18Cr, 10Ni, Nb), uno de los aceros inoxidables más utilizados, que además presentará un buen comportamiento en cuanto al esfuerzo máximo permisible a las condiciones de operación. Este mismo material se selecciona también para las columnas C-101, C-102 y C-302.

7.7 Sistema PSA

Para purificar la corriente procedente de la columna de absorción C-301, que ya cuenta con un 94,39% de H_2 , se emplea un sistema PSA (*Pressure Swing Adsorption*). Esta unidad se basa en la separación física de moléculas gaseosas en un material adsorbente.

En la Figura 41 se muestra una imagen de un sistema PSA con 10 lechos de adsorción.



Figura 41. Sistema de purificación PSA. Fuente: [66]

La fuerza de adsorción entre las diferentes especies gaseosas y el material adsorbente depende de la naturaleza de los propios componentes del gas, del tipo de adsorbente, de la presión parcial de cada especie y la temperatura de operación. En la Figura 42 se recogen los diferentes compuestos ordenados en función de su afinidad por los materiales adsorbentes.

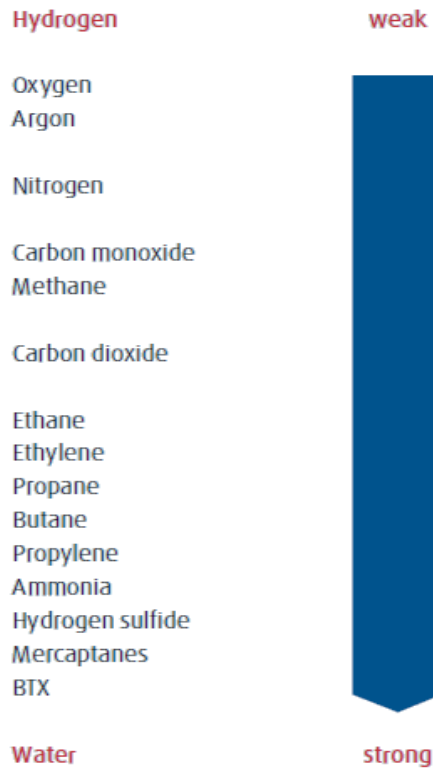


Figura 42. Clasificación de compuestos en función de su afinidad por materiales adsorbentes. Fuente: [66]

La separación de los diferentes componentes de una mezcla gaseosa mediante esta tecnología se basa precisamente en las diferentes tendencias de los compuestos a ser adsorbidos. De este modo, los compuestos con alta volatilidad y baja polaridad, como por ejemplo el hidrógeno, apenas se adsorben, mientras que otras moléculas como CO, CO₂, hidrocarburos o vapor de agua, presentan mucha mayor tendencia a ser adsorbidos. Por lo tanto, estas impurezas pueden quedar retenidas en los lechos de relleno del sistema de PSA, produciendo una corriente de hidrógeno de alta pureza. De la corriente que se alimenta a los lechos adsorbentes, a parte del H₂, el otro compuesto con menor afinidad por el adsorbente es el N₂, que no podrá ser adsorbido en su totalidad, y una pequeña fracción saldrá en la corriente de H₂ de alta pureza. [66]

Concretamente, el sistema PSA del presente trabajo está formado por cuatro lechos idénticos (C-303, C-304, C-305 y C-306) para garantizar un flujo de hidrógeno puro (99,9%) y continuo en el tiempo.

7.7.1 Principio de funcionamiento

El proceso PSA trabaja a temperatura constante alternando diferentes ciclos de presión para adsorber y desorber las especies gaseosas. Para evitar el uso de sistemas de calentamiento o enfriamiento los ciclos deben de durar periodos de tiempo cortos. [66]

En la Figura 43 se muestran diferentes isothermas de adsorción, las cuales representan la relación entre la presión parcial de cada componente y su carga de equilibrio sobre el material adsorbente a distintas temperaturas. Asimismo, se puede observar como la mayor capacidad de adsorción (carga diferencial del lecho entre la presión de operación en la adsorción y la presión de desorción) se alcanza a 30 °C. Esta será por lo tanto la temperatura de operación seleccionada para la operación del sistema PSA del presente trabajo.

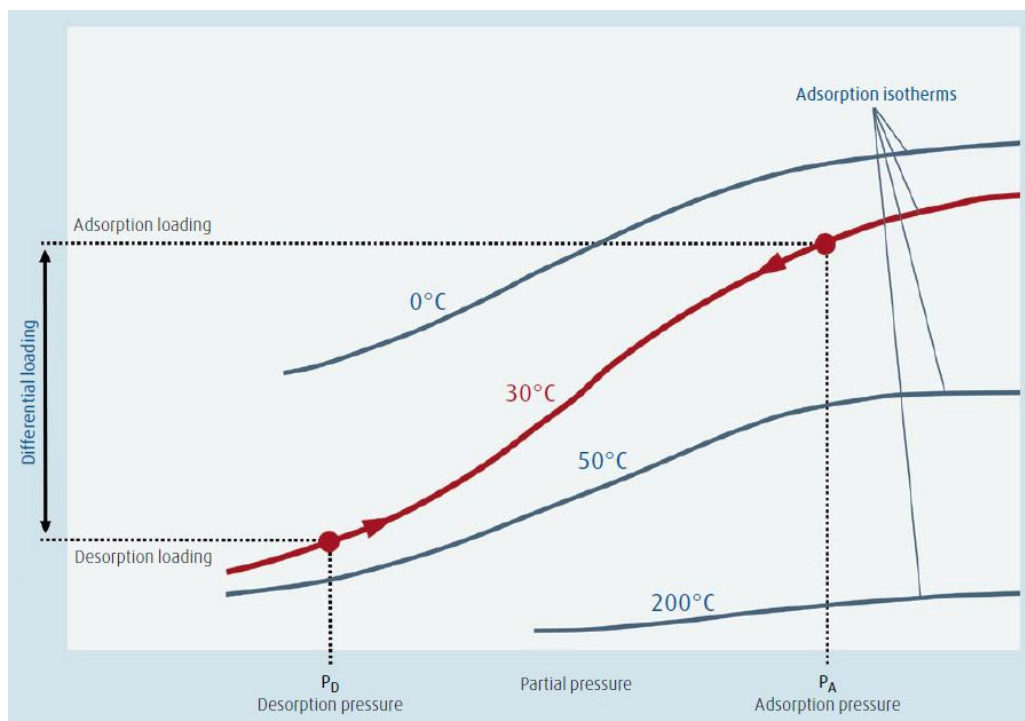


Figura 43. Isothermas de adsorción y de desorción. Fuente: [66]

El proceso de adsorción se realiza a altas presiones, típicamente en el rango de 10 a 40 bares, hasta que se alcanza el equilibrio y ya no es posible retener más impurezas. En consecuencia, el material adsorbente debe ser regenerado para poder seguir con el proceso de purificación. Para regenerarlo se reduce la presión, reduciendo la carga de equilibrio, permitiendo la desorción de las especies retenidas. Una vez terminada la etapa de desorción, se vuelve a elevar la presión hasta la requerida por el proceso de adsorción y el ciclo vuelve a

empezar. A continuación se describirá de forma pormenorizada todas las fases que constituyen dicho ciclo. [66]

7.7.2 Descripción del ciclo de operación

El ciclo completo de funcionamiento del sistema PSA consiste en cuatro etapas básicas: adsorción, despresurización, regeneración y re-presurización. Para garantizar un continuo flujo de hidrógeno es necesario utilizar como mínimo cuatro columnas de adsorción. En la Figura 44 se representa la combinación de la secuencia de cuatro adsorbedores a lo largo del tiempo.

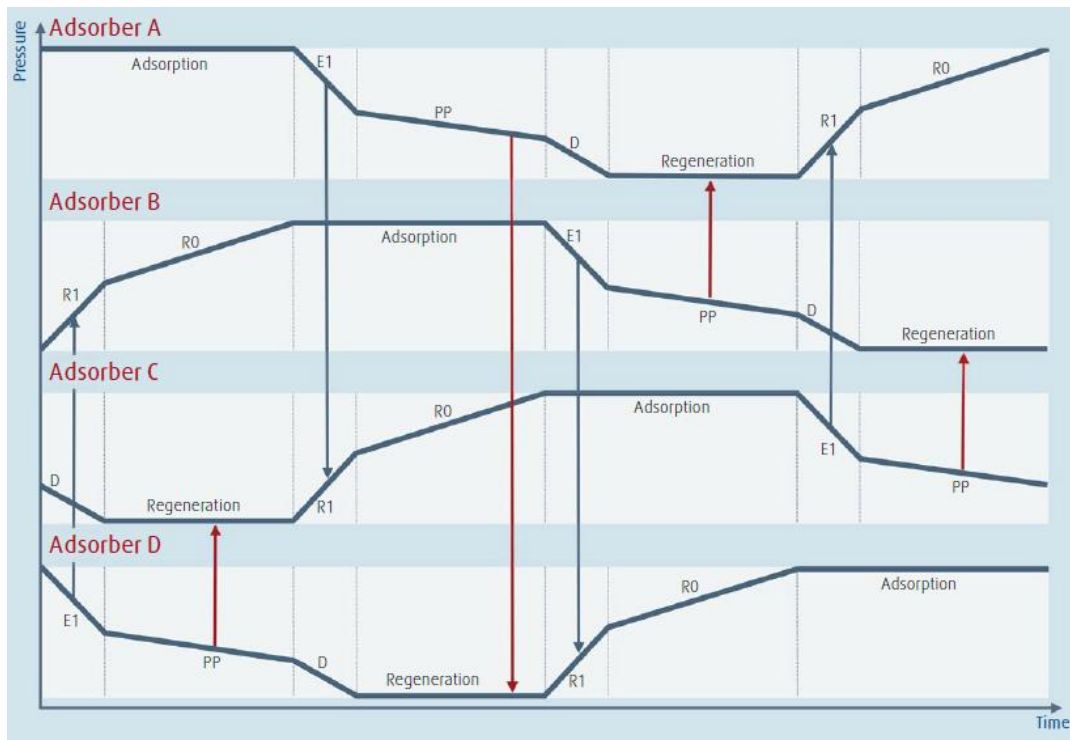


Figura 44. Ciclo completo del proceso de adsorción con cuatro lechos. Fuente: [66]

A continuación, se detallan las etapas del ciclo de adsorción del sistema PSA de la Figura 44.

- **Adsorción:** El proceso de adsorción de impurezas es llevado a cabo a una presión elevada determinada por la presión del gas alimentado. El gas fluye a través de los adsorbedores en una dirección ascendente. Todas las impurezas presentes en el gas, como el vapor de agua, CH_4 , CO , CO_2 y N_2 son retenidos de forma selectiva sobre la superficie del material adsorbente. La corriente de salida, que está formada por hidrógeno de alta pureza, sale por la parte superior del recipiente. Después de un tiempo

establecido, esta fase finaliza y empieza la etapa de regeneración. En este mismo instante, otro tanque empieza su ciclo de adsorción manteniendo un flujo de hidrógeno constante en la línea de salida. [66]

- **Regeneración:** Esta etapa consiste básicamente en los siguientes pasos:

- Ecualización de la presión
- Suministro de gas de purga, de regeneración o de desorción
- Liberación de la presión remanente
- Regeneración o desorción
- Re-presurización

Estos pasos son combinados para minimizar las pérdidas de hidrógeno y, en consecuencia, maximizar su recuperación en el sistema PSA. [66]

- Ecualización de la presión (paso E1): La despresurización empieza en la dirección de la corriente de proceso desde la parte inferior a la superior. El hidrógeno, todavía almacenado en el espacio vacío del material adsorbente, es usado para presurizar otro adsorbedor que justo en ese instante está terminando su regeneración. En la Figura 44 se puede observar como esta comunicación entre los recipientes se simboliza mediante una flecha azul oscuro. Esta fase finaliza en el momento en el que ambos recipientes alcanzan la misma presión. Dependiendo del número de equipos y de las condiciones de operación, pueden ser realizados de uno a cuatro pasos de igualación de presión. Cada paso adicional de igualación minimiza las pérdidas de hidrógeno.
- Suministro de gas de purga, de regeneración o de desorción (paso PP): Esta es el final de la etapa de despresurización en dirección ascendente, expulsándose una corriente gaseosa de hidrógeno puro que se empleará para regenerar otro adsorbedor. La comunicación entre este recipiente y el recipiente que se encuentra en regeneración se observa en la Figura 44 representada por una flecha roja. Se observa como el recipiente en fase PP disminuye progresivamente su presión, mientras que en el otro avanza la regeneración.
- Liberación de la presión remanente (paso D): Es necesario que la presión del recipiente inicial disminuya hasta alcanzar la presión de operación requerida por la desorción o regeneración. Pero la presión no se puede disminuir del mismo modo en el que se disminuía en la fase anterior. Cuando la fase anterior se da por finalizada, la presión remanente debe ser liberada en contracorriente para prevenir que las impurezas salgan por la parte superior del adsorbedor. Es decir, si se permitiese que la presión continuase disminuyendo al enviar gas al recipiente que se encuentra en regeneración (fase PP), se terminaría alcanzando la presión requerida para la regeneración en el

primer recipiente, estando comunicado con el segundo, dado que las presiones de ambos recipientes se acabarían igualando. Por lo que, con esto lo único que se conseguiría sería enviar impurezas a otro tanque que precisamente ya se encontraba en fase de eliminar las impurezas retenidas en su propio lecho (regeneración).

Por lo tanto, se podría considerar como el primer paso de la etapa de regeneración del lecho inicial, de forma que las impurezas desorbidas se expulsan por la parte inferior del equipo y fluyen hacia el sistema de fuel gas.

- Regeneración o desorción: El momento final de la etapa de desorción presenta la menor presión producida en el ciclo del sistema PSA. El hidrógeno de alta pureza producido en la etapa de suministro de gas de purga (de regeneración o de desorción), entra por la parte superior del recipiente y es usado para purgar las impurezas del lecho hacia el sistema de fuel gas, expulsándose por la parte inferior. La carga residual en el material adsorbente es reducida al mínimo para garantizar la máxima eficiencia del ciclo PSA. Esta carga será menor cuanto menor sea la presión de esta fase.
- Re-presurización (pasos R1 y R0): Antes de empezar el ciclo de adsorción nuevamente, el lecho regenerado debe de ser presurizado de nuevo. Este paso es realizado durante la etapa de igualación de presión, usando hidrógeno de alta pureza, de otros adsorbedores durante su despresurización. Debido a que no es posible alcanzar la presión de adsorción únicamente mediante este procedimiento, también se utiliza parte del hidrógeno de la corriente de producto, que se recircula. Al terminar esta etapa, el lecho regenerado comienza a adsorber impurezas de la corriente de alimentación, cogiendo el relevo de otro recipiente cuyo lecho ya se ha cargado completamente y no es capaz de adsorber más impurezas. [66]

En la Figura 45 se pueden ver de nuevo estas etapas, mostrando se en este caso el sentido (ascendente o descendente) de cada uno de los fenómenos que se suceden y de cada una de las conexiones entre tanques que tienen lugar en un sistema PSA.

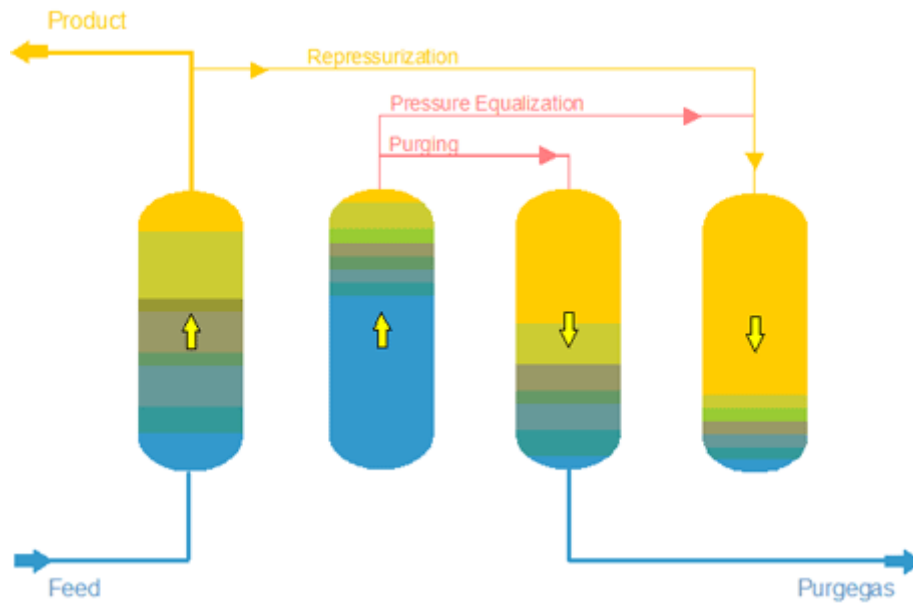


Figura 45. Ciclo de un sistema PSA. Fuente: [67]

7.7.3 Selección del adsorbente

Las principales características que debe tener un material adsorbente para su uso en aplicaciones industriales son:

- Alta selectividad que permita buenas separaciones
- Alta capacidad de adsorción
- Alta estabilidad térmica y química
- Baja oposición al flujo de gas
- Coste relativamente bajo

Existen multitud de sólidos con capacidades adsorbentes, pero muy pocos que cumplan con todos los requerimientos anteriores. Actualmente se emplean fundamentalmente cuatro tipos de materiales: carbón activo, tamiz molecular de zeolitas, sílica gel y alúmina activada.

- **Carbón activo:** De todos ellos es el más usado y se puede presentar en multitud de formas como: polvo, pellets, gránulos, cilindros, esferas y fibras. El tamiz molecular de carbón también es comercializado y presenta muy buena distribución del tamaño de poros en comparación con carbón activo normal. [49]
- **Tamiz molecular de zeolitas:** El tamiz molecular de zeolitas (MSZ) está formado por estructuras resistentes de aluminosilicatos cristalinos. Se pueden crear diferentes estructuras cambiando el ratio entre silicio y aluminio en la disolución inicial y las condiciones de cristalización y de secado. Debido a que presentan canales muy

regulares tienen una alta selectividad por componentes polares e hidrofílicos. Son capaces de crear enlaces muy fuertes con el agua, CO₂, H₂S y otros compuestos similares, mientras que con compuestos orgánicos sus enlaces son débiles. Se podría hacer un tamiz completamente de silicio pero, a diferencia de las demás zeolitas, éste presenta un carácter hidrofóbico, con lo que un comportamiento es más cercano al carbón activo. Una ventaja de los lechos de zeolita sobre los de carbón activo es que tienen una gran estabilidad térmica, con lo que pueden ser regenerados en condiciones más severas. [49]

- **Sílica gel:** La sílica gel presenta una elección intermedia entre un comportamiento hidrofílico y un hidrofóbico. Este tipo de adsorbente es el más usado para eliminar agua de varios gases, además de que también es capaz de capturar hidrocarburos. [49]
- **Alúmina activada:** La alúmina activada presenta una alta afinidad por el agua por lo que se emplea en aplicaciones de secado de gases. Al igual que con la sílica gel, el agua no crea enlaces tan fuertes con su superficie como con la de los tamices moleculares, haciendo posible la regeneración de este tipo de lechos a temperaturas más bajas. [49]

En la Tabla 34 se recogen las principales características de cada componente.

Tabla 34. Propiedades típicas de adsorbentes comerciales. Fuente: [49]

Tipo	Diámetro de poro (nm)	Densidad de partícula (kg/m ³)	Porosidad de partícula	Área Superficial (10 ⁵ m ² /kg)	H ₂ O capturado a 25 °C y 4,6 mmHg (% en peso)	CO ₂ capturado a 25 °C y 250 mmHg (% en peso)
Carbón activo						
Poros corto	1-2,5	500-900	0,4-0,6	4-12	1	5
Poros largo	>3	600-800	-	2-6	-	7
Tamiz molec.	0,2-1,0	980	-	4	-	NA
Tamiz molecular						
3A	0,3	670-740	0,2	7	20	NA
4A	0,4	660-720	0,3	7	23	13
5A	0,5	670-720	0,4	6,5	21	15
13X	0,8	610-710	0,5	6	25	16
Mordenita	0,3-0,4	720-800	0,25	7	9	6
Chabazita	0,4-0,5	640-720	0,35	6,5	16	12
Sílica gel						
Poros corto	2,2-2,6	1000	0,47	8	11	3
Poros largo	10-15	620	0,71	3,2	-	NA
Alúmina activada	1-7,5	800	0,50	3,2	7	2

En el presente trabajo se emplea como relleno de las torres de adsorción lechos de carbón activo. [68]

7.7.4 Requerimientos y condiciones de operación

Las dos principales variables que se persiguen optimizar en un sistema de PSA son la pureza del producto final y el porcentaje de recuperación, es decir, en el caso del presente trabajo, cuánto hidrógeno del que se alimenta se obtiene como producto. Ambos parámetros varían de forma inversa, de modo que si se busca obtener una mayor pureza, el porcentaje de hidrógeno que se recupera disminuye. En muchos casos, aumentar en uno el número de nueves las cifras decimales de la pureza del producto, puede hacer disminuir el porcentaje de recuperación hasta en un 10%.

Típicamente, los rangos de recuperación oscilan entre un 60 y un 95% en función de las condiciones de operación, fundamentalmente la presión de alimentación, la presión mínima de descarga, y como se ha dicho anteriormente, la pureza requerida. Esta pureza puede llegar a ser incluso del 99,9999% molar. [66, 68, 69]

Con el sistema PSA del presente trabajo, constituido por los adsorbedores C-303, C-304, C-305 y C-306, con lechos de relleno de carbón activo, se busca obtener una pureza en el producto final del 99,9% y un porcentaje de recuperación del 90%. Para lo cual se operará con una presión de alimentación de 20,2 bares, y se fijará la presión de salida del fuel gas de la fase de regeneración (la fase con la presión más baja del ciclo) en 3,5 bares. La temperatura de operación, como se ha dicho antes, se mantiene constante en el tiempo, con un valor de 30 °C. Como se ha observado en la Figura 43, con esta temperatura lo que se busca es maximizar la capacidad adsorbente del lecho.

Además el hecho de disponer, antes del sistema PSA, de un sistema de absorción con aminas, permite reducir en gran medida las cargas a las que se somete el material adsorbente. Impurezas de alrededor del 5% en la corriente de alimentación permiten reducir significativamente el tamaño del lecho, y mediante el absorbedor C-301, diseñado en el presente trabajo, se consigue obtener ya una pureza de H₂ del 94,39% molar a la salida del mismo, con lo que las impurezas representan tan sólo el 5,61% de la corriente de alimentación al PSA. [69]

7.7.5 Descripción de los equipos

El volumen del lecho adsorbente de cada recipiente se puede determinar en función de la masa del material adsorbente y de la densidad aparente del mismo. El recipiente de adsorción puede dimensionarse como un cilindro que contiene el volumen del lecho. Normalmente se sobredimensiona un 20 % el volumen para colocar un lecho formado por un material inerte en la parte superior e inferior del equipo. El objetivo de esto es garantizar un flujo uniforme en la entrada y en la salida y prevenir caminos preferenciales de las impurezas a través del lecho. La relación altura/diámetro del lecho suele ser de 3:1 para asegurar que se obtienen una carga fraccional elevada y que el adsorbente se usa eficazmente. [38]

En la Figura 46 se muestra una representación del interior de un adsorbedor de un sistema PSA.

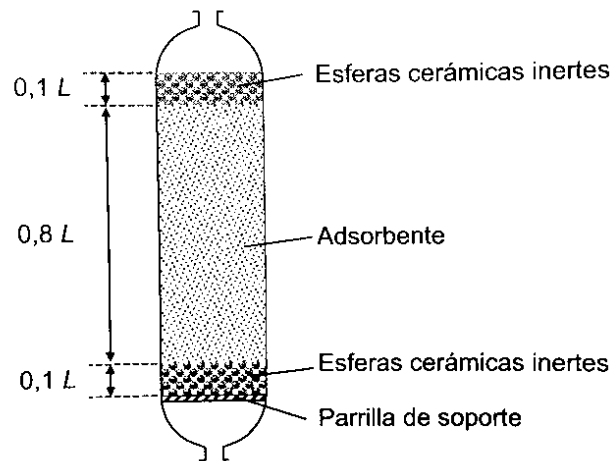


Figura 46. Componentes internos de un PSA. Fuente: [38]

En cuanto a los materiales de fabricación, el sistema PSA está formado principalmente por recipientes a presión, con lo que se aplica el estándar *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* (el código ASME BPV).

El material seleccionado para estos equipos es el acero inoxidable AISI 304 (18Cr, 8 Ni), uno de los aceros inoxidables más comunes para recipientes a presión. [38]

8. CONTROL E INSTRUMENTACIÓN

8.1 Introducción

Los procesos industriales distan de ser estáticos debido a que se encuentran cambiando constantemente por a la existencia de perturbaciones que alteran las condiciones de operación. Si no se realizan las acciones pertinentes, las variables de proceso, las cuales están relacionadas con la seguridad y el rendimiento de la planta, no cumplirán sus valores de diseño creando situaciones de peligro o un mal funcionamiento. Debido a la gran interacción entre las condiciones de cada equipo, cualquier cambio que ocurra en uno se propagará a las demás unidades si no existe ningún medio que lo evite. Por ello, es necesario un sistema de control que vigile y que evite las perturbaciones, las cuales pueden deberse a cambios en la calidad de la materia prima, la variabilidad de la temperatura ambiente, ensuciamiento y mal funcionamiento de equipos, etc. [70]

En consecuencia, el objetivo principal del control automático de procesos es mantener con la mínima intervención humana en los valores requeridos las variables de proceso tales como presión, temperatura, caudal, composición, entre otras.

Un buen sistema de control consigue y debe garantizar en todo momento las siguientes cuestiones:

- **Seguridad.** Es lo más importante, si un proceso no es seguro, no debe llevarse a cabo. Cualquier sistema de control debe proporcionar una operación estable y segura en la que no se produzcan grandes oscilaciones que puedan poner en peligro la seguridad de las personas y la integridad de los equipos.
- **Calidad del producto.** Todo producto debe mantener unos estándares de calidad (composición, pureza, color, etc.) y ajustar sus características a la demanda. Esto implica que en función del mercado puede ser necesario cambiar las propiedades de los productos con lo que el sistema de control debe ser capaz de responder a ello.
- **Producción.** El sistema de control debe mantener la producción de la planta en los niveles adecuados.
- **Medio ambiente.** Es de vital importancia controlar el rendimiento de los equipos (por ejemplo, energético) y las emisiones producidas para que siempre estén dentro de los límites legislativos. [70]

8.2 Elementos constituyentes de un control automático

Los componentes básicos de todo sistema de control son: sensor, transmisor, controlador y actuador. En la Figura 47 se muestra un ejemplo con los instrumentos de un sistema de control para un intercambiador de calor. [70]



Figura 47. Elementos constituyentes de un sistema de control de un intercambiador. Fuente: [70]

8.2.1 Sensor

También denominado como elemento primario, es el encargado de medir la variable física a controlar. En algunos casos se mide una variable secundaria a partir de la cual se puede estimar la de interés, esto se hace porque no es posible medirla directamente o es demasiado caro. [70]

8.2.2 Transmisor

Elemento secundario encargado de transformar la señal generada por el sensor en otra de fácil transmisión (neumático, eléctrico o inalámbrico) y que sea reconocible por el controlador. Normalmente se utiliza una señal eléctrica continua dentro del rango 4-20 mA. [70]

8.2.3 Controlador

Elemento lógico que opera de forma continua y recibe la señal emitida por el transmisor, la compara con un valor de referencia (*set point*) y calcula la acción de control correspondiente en base a un algoritmo con tal fin. [70]

8.2.4 Actuador

Es el elemento final de control y es el encargado de manipular una variable de proceso conforme a la señal emitida por el controlador. En la mayor parte de los casos son válvulas de control, aunque también existen compresores de velocidad variable, resistencias eléctricas, motores, etc. [70]

8.2.5 PLC

Existe otro tipo de controlador presente en el presente proceso. Este es el controlador lógico programable o PLC, cuya función es realizar operaciones matemáticas y ejecutar una serie de órdenes previamente programadas. En concreto, se emplea para controlar el PSA, debido a que necesita un control secuencial en el que se deben abrir y cerrar una serie de válvulas de forma ordenada. [71]

8.3 Elementos de seguridad

Además de los instrumentos pertenecientes al sistema de control básico, hay otros presentes más relacionados con la seguridad, son los sistemas de alivio y el sistema de alarmas.

8.3.1 Sistema de alarmas

Los sistemas de alarma consisten en algún tipo de aviso sonoro o luminoso cuya función es indicar una posible condición insegura con el suficiente tiempo como para garantizar que se puedan emprender acciones correctoras antes de que se alcance la situación de peligro. [72]

Dichas alarmas actúan cuando una determinada variable se desvía demasiado de su valor, ya sea por ser demasiado bajo o alto. Estos elementos son independientes del sistema de control básico y solamente indican dichas desviaciones, con lo que es necesaria una intervención humana para emprender una acción correctora. [72]

El ser humano introduce un factor de error elevado en el cálculo de la probabilidad de fallo en el sistema de seguridad en el que participa. Por ello, y porque no sería capaz de administrar una infinidad de alarmas, es fundamental una buena política de gestión de alarmas en planta, la cual deben conocer todos los operadores. [72]

Toda acción hecha por un operador referente a la toma de decisiones por la presencia de una alarma, debe estar recogida en un procedimiento escrito que aporte toda la información necesaria para que pueda devolver al proceso a un estado seguro de forma eficiente sin crear nuevos peligros. Además de ello, el tiempo de respuesta desde que se genera la alarma hasta que se consigue devolver al proceso a niveles seguros, debe ser suficiente para que el operador pueda entender y buscar la solución al problema dentro de unos márgenes de seguridad. [72]

8.3.2 Dispositivos mecánicos de alivio de presión

Los dispositivos de alivio de presión son elementos de seguridad utilizados en cualquier recipiente (tanques, depósitos, intercambiadores, etc.) que contenga gases o líquidos a presiones mayores a la atmosférica, que evitan que el recipiente sufra roturas, con el consiguiente peligro. [71]

La forma de controlar el exceso de presión es liberar fluido al exterior, ya sea a la atmósfera o a un recipiente colector diseñado para tal función.

Todo dispositivo de alivio deber estar diseñado para que actúe a una presión inferior a la de fallo del recipiente. Además de ello, debe permitir el caudal suficiente que asegure el descenso inmediato de la presión en cualquier condición de funcionamiento del sistema. En el caso de existir una alarma, el sistema de alivio actuará después de su activación si la presión sigue aumentando y no existe ninguna acción correctora que lo impida. [71]

Los sistemas de alivio más empleados en la industria son las válvulas de seguridad y los discos de ruptura, siendo los primeros los utilizados en el los recipientes a presión de la presente planta de reformado. [71]

Las partes de una válvula de seguridad de acción o presión directa se muestran en la Figura 48.

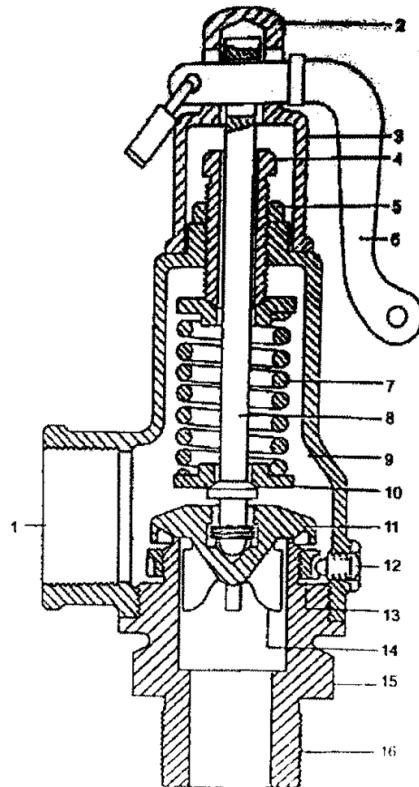


Figura 48. Válvula de seguridad de acción o presión directa. Fuente: [71]

Donde:

1. Boca de salida lateral
2. Caperuza
3. Sombrero o bonete
4. Tornillo de ajuste
5. Tuerca de fijación del ajuste
6. Palanca de apertura manual
7. Resorte
8. Husillo o vástago
9. Cuerpo
10. Placa del estremo del resorte
11. Disco de cierre de la válvula
12. Tornillo de fijación del anillo del ajuste
13. Anillo de ajuste del escape
14. Elemento de guiado en parte inferior
15. Asiento
16. Conexión roscada al recipiente

8.4 Nomenclatura

La representación gráfica del sistema de control presenta una simbología específica, siendo la propuesta por la *International Society of Automation* (ISA) la más utilizada. Esta simbología es la empleada en el Diagrama de Instrumentación y Tuberías (P&ID). [70]

Los tipos de señales que se utilizan como comunicación entre los elementos de control también están estandarizados. El tipo de señal más utilizado es la señal eléctrica, la cual toma valores entre 4 y 20 mA, aunque existen otros rangos menos usados. Las señales neumáticas se utilizan principalmente para accionar las válvulas neumáticas y abarcan un rango de entre 3 y 6 psig. Actualmente también se utilizan otros sistemas de comunicación más modernos, los llamados buses de campo, los cuales utilizan una señal digital, la cual puede ser transmitida por medios tanto eléctricos como ópticos o inalámbricos. [70]

En la Tabla 35 se muestra como se representan los distintos tipos de señal en un diagrama P&ID.

Tabla 35. Señales de comunicación entre instrumentos de un sistema de control para un P&ID. Fuente: [70]

Tipo de señal	Representación
Conexión de proceso	
Señal neumática	
Señal eléctrica	
Tubo capilar	
Señal indefinida	
Señal electromagnética o de sonido	
Señal hidráulica	

En la Figura 49 se muestra la simbología empleada en un P&ID para representar la instrumentación.



Figura 49. Simbología de la instrumentación de control. Fuente: [70]

La identificación de los instrumentos que conforman el sistema de control se realiza como se indica en la Figura 50.

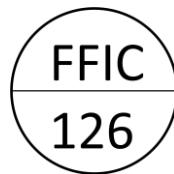


Figura 50. Simbología de un elemento de control

Donde:

- 1ª letra: variable controlada
- 2ª letra: modificador de la variable controlada
- 3ª letra: función del elemento
- 4ª letra: modificador de la función del elemento
- 1^{er} número: sección
- 2º número: lazo
- 3^{er} número: instrumento

Como se puede observar en la Figura 50, se trata de un círculo que presenta un código alfanumérico. En la parte superior se escribe el nombre o tipo de instrumento, siendo la primera letra la variable controlada y las demás la función y posibles modificadores. En la parte inferior se indica el número asociado al lazo de control, donde el primer dígito es la sección, el segundo el lazo y el tercero el instrumento.

En la Tabla 36 se recogen las letras de identificación de cualquier instrumento.

Tabla 36. Letras de identificación de los elementos de control. Fuente: [70]

Primera letra			Letras sucesivas		
	1ª letra	Modificador	Función pasiva	Función salida	Modificador
A	Análisis	-	Alarma	-	-
B	combustión	-	Libre	Libre	Libre
C	Libre	-	-	Control	-
D	Densidad/Peso específico	Diferencial	-	-	-
E	Tensión	-	Elemento primario	-	-
F	Caudal	Relación	-	-	-
G	Libre	-	Visor/Vidrio	-	-
H	Manual	-	-	-	Alto
I	Intensidad	-	Indicador	-	-
J	Potencia	Exploración/ Muestreo	-	-	-
K	Tiempo	Razón de cambio de tiempo	-	Estación de control	-
L	Nivel	-	Luz piloto	-	Bajo
M	Humedad	Momentáneo	-	-	Medio
N	Libre	-	Libre	-	Libre
O	Libre	-	Orificio	-	-
P	Presión/Vacío	-	Punto de prueba	-	-
Q	Cantidad	Integración	-	-	-
R	Radiación	-	Registrador	-	-
S	Velocidad/ Frecuencia	Seguridad	-	Interruptor	-
T	Temperatura	-	-	Transmisor	-
U	Multivariable	-	Multifunción	Multifunción	Multifunción
V	Vibración	-	-	Válvula	-
W	Peso/Fuerza	-	Pozo	-	-
X	Sin clasificar	Eje X	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar

Tabla 36 (Continuación). Letras de identificación de los elementos de control. Fuente: [70]

Primera letra			Letras sucesivas		
1ª letra	Modificador	Función pasiva	Función salida	Modificador	
Y	Evento/Estado/ Presencia	Eje Y	-	Relé/ Convertidor	-
Z	Posición/ Dimensión	Eje Z	-	Actuador sin clasificar	-

8.5 Estrategias de control

Las estrategias de control empleadas en el presente proceso industrial se basan principalmente en dos, el control feedback sencillo y control ratio.

8.5.1 Control *feedback* sencillo

Es el sistema de control más simple, se basa en medir la variable controlada y, en función de la diferencia entre su valor y el *set point*, determina el error y actúa para corregirlo.

En el momento que el controlador detecta el error debido a posibles perturbaciones envía una señal calculada en base a un algoritmo que tenga programado al actuador, para que realice una acción correctiva y vuelva al sistema al punto de operación. [70]

En la Figura 51 se muestra el diagrama de bloques de un lazo *feedback*.

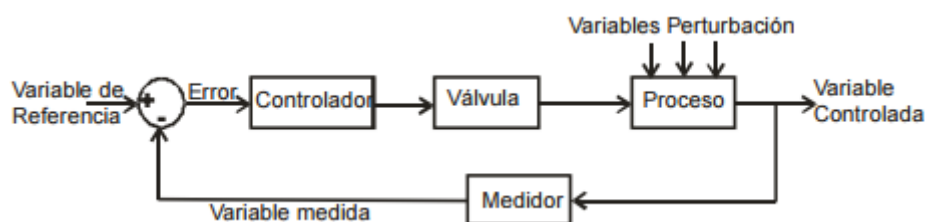


Figura 51. Diagrama de bloques de un lazo de control *feedback*. Fuente: [70]

Este tipo de control presenta una serie de ventajas, las cuales hacen que sea la estrategia más utilizada en la industria de procesos: [70]

- Estrategia simple capaz de compensar cualquier perturbación, sea cual sea su origen. Cuando la variable controlada se desvía del valor deseado y aparece el error, el actuador actúa para compensarlo.
- No necesita un gran conocimiento del proceso a controlar.
- El controlador es versátil y robusto, adaptándose con facilidad a nuevas condiciones de operación.

Por otro lado, tiene una serie de desventajas: [70]

- Sólo es capaz de compensar las perturbaciones cuando la variable controlada ya se desvió del valor del *set point* con lo que requiere que la alteración se propague por todo el proceso antes de realizar la acción de control.
- Es necesario medir en línea la variable a controlar u otra que esté directamente relacionada con la misma.
- No es eficaz para procesos lentos o con grandes tiempos muertos.

8.5.2 Control ratio

El control ratio se encarga de mantener la relación entre dos variables manipulando una tercera. En la presenta planta de producción de hidrógeno, los controles ratio son utilizados para mantener una relación de flujo requerida.

Como ejemplo de utilización se puede destacar el vapor de agua introducido junto con el gas natural en la entrada al reformador R-201. La proporción entre vapor de agua y cantidad de carbono se fija y debe mantenerse en 3:1, con lo que cualquier variación en el flujo del gas natural modificaría dicha relación si no existe ningún sistema de control.

Este tipo de control utiliza la medición de los dos flujos utilizando uno de ellos para determinar el *set point* del controlador y así determinar la desviación del otro flujo y, en consecuencia, enviar una señal a un actuador para que lo corrija. [71]

En la Figura 52 se muestra una representación esquemática de este sistema.

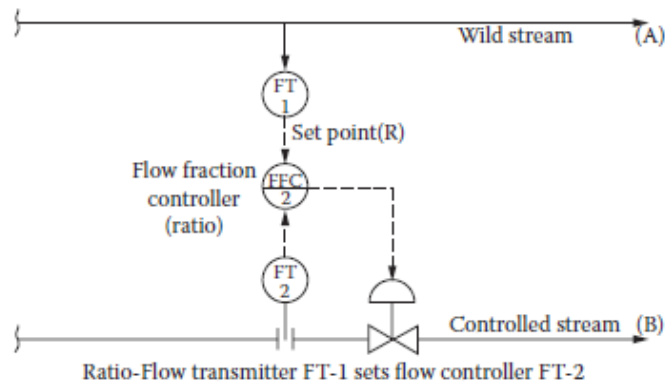


Figura 52. Diagrama de bloques de un lazo de control ratio. Fuente: [71]

8.6 Controladores: algoritmo PID

Existen diferentes tipos de controladores *feedback* en función de su funcionamiento. Los más utilizados emplean en el algoritmo PID: proporcional (P), integral (I) y derivativo (D).

El control proporcional se basa en que la acción de control es proporcional a la desviación de la variable controlada. Se trata de un sistema relativamente rápido pero presenta un problema, el llamado *offset*. El *offset* es una desviación permanente de la variable controlada debida a que la acción del controlador P no es capaz de corregirla completamente.

Para eliminar el *offset* se puede utilizar el control integral, el cual es capaz de compensarlo eliminándolo por completo, pero es demasiado lento. La solución es emplear un sistema formado por ambos (PI) que presenta las ventajas de cada uno. [73]

En aquellos casos en los que es necesaria una mayor velocidad de respuesta se puede emplear el control derivativo, el cual es capaz de predecir en intervalos de tiempo cortos el comportamiento del proceso. Un problema que presenta es que es muy sensible al ruido y puede crear inestabilidad en el lazo de control. Este tipo de control nunca se usa solo, sino que se emplea en controles PD o PID. [73]

En función del objetivo al que está destinado el lazo de control se empleará un sistema de control u otro. Según la variable controlada, se pueden distinguir los siguientes casos:

- **Lazos de control de nivel.** El tipo de controlador empleado para este tipo de lazos es un controlador P debido a que se requiere una actuación rápida manteniendo el nivel dentro de un intervalo admisible. Esto es porque los cambios de nivel son lentos y no es necesario mantener un valor exacto del mismo permitiendo cierta variación.

- **Lazos de control de flujo.** Debido a que son sistemas muy rápidos se emplean controladores del tipo PI, los cuales son capaces de alcanzar el valor requerido, siendo fáciles de sintonizar.
- **Lazos de control de presión.** Presentan una dinámica muy rápida, siendo análogos a los de flujo.
- **Lazos de control de temperatura.** Debido a que este tipo de sistemas presentan una velocidad de respuesta más lenta, es necesario emplear un PID para mejorar el control. [73]

8.7 Descripción del sistema de control de la planta

A continuación se detalla el sistema de control del proceso de reformado de gas natural. Todos los lazos y demás elementos se recogen en el diagrama P&ID del presente proyecto, el cual se recoge en el Documento II: Planos.

8.7.1 Control de presión de la columna de absorción C-101: Lazo 110

La columna de absorción C-101 es un recipiente a presión en el cual se pone en contacto dos fases diferentes. Debido a que existe riesgo de que su presión interna varíe, es necesario controlarla para evitar el riesgo de sobrepresión o que se alteren las condiciones de operación.

Para ello, se emplea un lazo de control *feedback* en el cual se manipula el caudal de la corriente gaseosa de salida (producto desulfurado), ya que la presión responde rápidamente a cambios en dicho flujo. [71]

En la Tabla 37 se indican los instrumentos asociados al lazo de control 110.

Tabla 37. Instrumentos del lazo de control 110

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	PT-111
Controlador indicador de presión	PIC-111
Válvula de presión	PV-111

8.7.2 Control de nivel de la columna de absorción C-101: Lazo 120

Debido a dentro de la columna C-101 coexisten dos fases, una vapor que asciende y otra líquida que desciende, es necesario controlar el nivel de líquido de su interior. Si el nivel es demasiado alto se inundará la columna creando un gran riesgo de rotura mecánica.

Por ello, se coloca un lazo de control *feedback* sencillo, con el cual se controla el nivel de la columna C-101 manipulando el caudal de salida líquida (amina rica). [71]

En la Tabla 38 se listan los instrumentos asociados al lazo de control 120.

Tabla 38. Instrumentos del lazo de control 120

Instrumento	Identificador
Transmisor de nivel	LT-121
Controlador indicador de nivel	LIC-121
Válvula de nivel	LV-121

8.7.3 Control de presión de la columna de desorción C-102: Lazo 130

Es de vital importancia controlar la presión de la columna C-102 debido a que es un recipiente a presión y existe peligro de explosión y para mantener las condiciones de operación requeridas.

Debido a la presencia de gases no condensables (H_2S y CO_2) en el producto de cabezas, la presión interna de la columna va a responder rápidamente a cambios en su caudal. Por ello, se elige un control *feedback* sencillo donde en función de la presión de la columna se manipula el flujo de H_2S producido. [71]

En la Tabla 39 se recogen los instrumentos asociados al lazo de control 130.

Tabla 39. Instrumentos del lazo de control 130

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	PT-131
Controlador indicador de presión	PIC-131
Válvula de presión	PV-131

8.7.4 Control de nivel del separador de condensados S-101: Lazo 140

Los separadores de condensados son equipos dispuestos para estar llenos parcialmente de líquido para favorecer su separación de la fase vapor o gas. En consecuencia, dicho equipo

no puede vaciarse porque dejaría de ejercer su función, ni tampoco llenarse, ya que crearía un gran problema de seguridad.

Para mantener controlado el nivel dentro de S-101 se emplea un lazo de control *feedback* sencillo en el cual se manipula el caudal de fluido refrigerante del condensador E-104, de tal forma que dicho nivel es ajustado mediante la variación del poder enfriador del intercambiador. [71]

En la Tabla 40 se recogen los instrumentos del lazo 140.

Tabla 40. Instrumentos del lazo de control 140

Instrumento	Identificador
Transmisor de nivel	LT-141
Controlador indicador de nivel	LIC-141
Válvula de presión	LV-141

8.7.5 Control de temperatura de la parte inferior de la columna de desorción C-102: Lazo 150

Para controlar la temperatura de la parte inferior del desorbedor C-102 y, en consecuencia, la cantidad de vapor producido en el *reboiler* E-102 se emplea un lazo de control *feedback* sencillo.

El sistema de control empleado consiste en la manipulación del flujo de fluido térmico alimentado a E-102 según la variación de la temperatura de la parte inferior de la columna C-102. [71]

En la Tabla 41 se recogen los instrumentos pertenecientes al lazo 150.

Tabla 41. Instrumentos del lazo de control 150

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-151
Controlador indicador de temperatura	TIC-151
Válvula de temperatura	TV-151

8.7.6 Control de nivel de la columna de desorción C-102: Lazo 160

Debido a que es un recipiente en el cual coexisten una fase líquida y otra vapor, es necesario mantener controlado el nivel de líquido porque podría llegar a inundarse la columna C-102 provocando una situación de peligro.

Para el control del nivel se emplea un lazo *feedback* sencillo donde se manipula el flujo de líquido que sale por la parte inferior del desorbedor C-102. [71]

En la Tabla 42 se listan los instrumentos del lazo 160.

Tabla 42. Instrumentos del lazo de control 160

Instrumento	Identificador
Transmisor de nivel	LT-161
Controlador indicador de nivel	LIC-161
Válvula de nivel	LV-161

8.7.7 Control de nivel del *reboiler* E-102: Lazo 170

El *reboiler* E-102 es un equipo a presión con dos fases, con lo que es necesario evitar que se llene de líquido creando una situación de peligro o que se vacíe, dejando al descubierto los tubos calefactores creando también un problema.

Para ello, se utiliza un lazo de control *feedback* sencillo donde se manipula el caudal del producto de colas. [71]

En la Tabla 43 se listan los instrumentos presentes en el lazo 170.

Tabla 43. Instrumentos del lazo de control 170

Instrumento	Identificador
Transmisor de nivel	LT-171
Controlador indicador de nivel	LIC-171
Válvula de nivel	LV-171

8.7.8 Control de flujo de la bomba P-101 A/B: Lazo 180

Para mantener el flujo de líquido deseado que es proporcionado por la bomba P-101 A/B se emplea un sistema de control basado en una recirculación a la misma. El funcionamiento consiste en variar el caudal de dicha recirculación para mantener el caudal buscado constante. [74]

En la Tabla 44 se recogen los elementos pertenecientes al lazo 180.

Tabla 44. Instrumentos del lazo de control 180

Instrumento	Identificador
Transmisor de flujo	FT-181
Controlador indicador de flujo	FIC-181
Válvula de flujo	FV-181

8.7.9 Control de temperatura del intercambiador E-103: Lazo 190

La corriente pobre procedente del desorbedor C-102 debe ser enfriada hasta la temperatura requerida por el absorbedor C-101. Por ello, es necesario controlar el poder enfriador del intercambiador E-103.

El lazo de control consiste en un lazo *feedback* sencillo donde se manipula el caudal de fluido refrigerante de E-103 en función de la temperatura de la corriente líquida alimentada en la parte superior de C-101. [71]

En la Tabla 45 se numeran los elementos del lazo 190.

Tabla 45. Instrumentos del lazo de control 190

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-191
Controlador indicador de temperatura	TIC-191
Válvula de temperatura	TV-191

8.7.10 Control de flujo de la recirculación de gas: Lazo 210

Debido a las posibles fluctuaciones en el flujo de la corriente de gas natural desulfurada y en la de gas recirculado procedente del PSA, es de vital importancia controlar dicha recirculación para garantizar la cantidad de hidrógeno necesaria en la entrada del reformador R-201.

Para ello, se utiliza un control ratio en el que se manipula el flujo de gas recirculado en función del flujo de gas procedente del absorbedor C-101. [71]

En la Tabla 46 se numeran los elementos presentes en el lazo 210.

Tabla 46. Instrumentos del lazo de control 210

Instrumento	Identificador
Transmisor de flujo	FT-211
Transmisor de flujo	FT-212
Controlador indicador de relación de flujo	FFIC-211
Válvula de flujo	FV-211

8.7.11 Control de presión de descarga del compresor K-201: Lazo 220

Para controlar la presión de descarga del compresor se emplea un variador de velocidad del motor que impulsa dicho equipo. Al variar la velocidad de giro se produce un desplazamiento de la curva del compresor y, en consecuencia, del punto de funcionamiento. Este sistema es bastante eficiente debido a que sólo consume la potencia necesaria. [75]

El lazo de control empleado para este objetivo es un lazo *feedback* donde en función de la presión de descarga se regula la velocidad del compresor.

En la Tabla 47 se numeran los instrumentos presentes en el lazo 220.

Tabla 47. Instrumentos del lazo de control 220

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	PT-221
Controlador indicador de presión	PIC-221
Controlador de velocidad	SC-221

8.7.12 Control de flujo mínimo del compresor K-201: Lazo 230

Debido a que todo compresor centrífugo necesita un caudal mínimo para funcionar, se coloca una recirculación que garantice dicho flujo. La recirculación presenta una válvula de apertura rápida que se abrirá en el caso de alcanzarlo. De esta forma se evita el mal funcionamiento del compresor sin aumentar los costes de bombeo. [75]

En la Tabla 48 se numeran los instrumentos del lazo 230.

Tabla 48. Instrumentos del lazo de control 230

Instrumento	Identificador
Transmisor de flujo	FT-231
Interruptor de bajo flujo	FSL-231
Válvula manual	HV-231

8.7.13 Control de flujo del vapor de agua introducido junto con la alimentación del reactor R-201: Lazo 240

Una de las principales variables a controlar para evitar problemas en el reformador R-201 es la relación de gas natural y vapor de agua alimentado, la cual debe ser de 3:1. Si esta relación fuera muy baja se favorecería la formación de coque sobre el catalizador desactivándolo. Por ello, para protegerlo, es necesario utilizar un lazo de control que regule el flujo de vapor en función del de gas natural alimentado. [71]

El sistema de control se basa en un control ratio con una compensación de presión. Las posibles fluctuaciones en el flujo de gas natural se compensan con el controlador de flujo compensado por presión FIC-241. El ratio de vapor y gas natural se controla con FFC-241, el cual divide las señales procedentes de los transmisores FT-241 y FT-242. Si la relación entre ambas es muy baja, por ejemplo por debajo de 2,6:1, en primer lugar se activa la alarma de baja de relación de flujo y, en caso de seguir bajando por debajo de 2,3:1, la válvula HV-241 se cerrará bloqueando el paso de gas natural al reactor protegiendo el catalizador. [71]

En la Figura 53 se recoge una representación gráfica de dicho sistema de control.

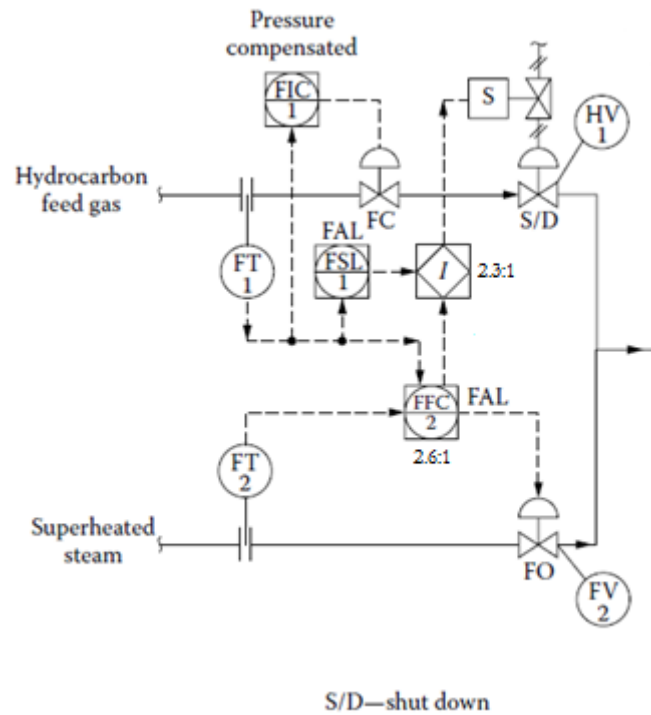


Figura 53. Sistema de control de relación de gas natural y vapor de agua a la entrada del reformador. Fuente: adaptado de [71]

En la Tabla 49 se numeran los instrumentos presentes en el lazo 240.

Tabla 49. Instrumentos del lazo de control 240

Instrumento	Identificador
Transmisor de flujo	FT-241
Controlador indicador de flujo	FIC-241
Válvula de flujo	FV-241
Interruptor de bajo flujo	FSL-241
Alarma de flujo bajo	FAL-241
Válvula manual	HV-241
Controlador de relación de flujo	FFC-241
Transmisor de flujo	FT-242
Válvula de flujo	FV-242
Interruptor de baja relación de flujo	FFSL-241
Alarma de baja relación de flujo	FFAL-241

8.7.14 Control del reactor R-201 (reformador)

Para determinar el grado de conversión se coloca un analizador de metano (AI-202) a la salida del reformador, el cual se puede ajustar manipulando el perfil de temperatura dentro del reactor. [71]

Además de ello, para una buena operación del reformador es necesario conocer la temperatura de la alimentación y del producto obtenido. Por ello, se colocan una serie de indicadores situados a la entrada y a la salida del mismo: TI-201, TI-202 y TI-203. El control de la temperatura del reformador normalmente es manual debido a la gran inercia que presenta el sistema de calentamiento. En consecuencia, la temperatura es constantemente motorizada y se realizan pequeños ajustes en el flujo de combustible periódicamente con la válvula manual HV-201. [71]

Por último, para mejorar la seguridad en dicho equipo se dispone de una alarma de alta temperatura en el reactor (TAH-201) para avisar de posibles incidencias en dicha variable.

En la Tabla 50 se recogen los instrumentos presentes en el reformador.

Tabla 50. Instrumentos asociados al reformador R-201

Instrumento	Identificador
Indicador de temperatura	TI-201
Indicador de temperatura	TI-202
Indicador de temperatura	TI-203
Indicador de composición	AI-202
Indicador de flujo	FI-201
Válvula manual	HV-201

8.7.15 Control de presión en la cámara de combustión del reformador R-201: Lazo 250

Para controlar la presión en la cámara de combustión del reformador se emplea un control *feedback* manipulando el flujo de los gases de escape expulsados en la chimenea. Este control se realiza de esta forma debido a la gran respuesta de la presión ante cambios en dicho flujo. [71]

En la Tabla 51 se recogen los instrumentos presentes en el lazo de control 250.

Tabla 51. Instrumentos del lazo de control 250

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	PT-251
Controlador indicador de presión	PIC-251

8.7.16 Control de temperatura del intercambiador E-202: Lazo 260

Para controlar la temperatura de entrada al reactor R-202 se modifica la capacidad enfriadora del intercambiador E-202.

Por ello, se emplea un lazo de control *feedback* sencillo donde en función de dicha temperatura se manipula el flujo del fluido refrigerante. [71]

En la Tabla 52 se recogen los instrumentos del lazo de control 260.

Tabla 52. Instrumentos del lazo de control 260

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-261
Controlador indicador de temperatura	TIC-261
Válvula de temperatura	TV-261

8.7.17 Control del reactor R-202 (HTS)

Se trata de un reactor adiabático de lecho fijo en el que ocurre una reacción exotérmica. Debido a que la temperatura de entrada ya está controlada con el lazo 260, no requiere un control de dicha variable ya que siendo una reacción reversible no va a ser capaz de producir un mayor aumento de temperatura del predicho.

Por ello, no se emplea ningún lazo de control, si no que se monitoriza las condiciones de salida del mismo con los indicadores pertinentes para garantizar una buena operación, además de colocar una alarma de alta temperatura (TAH-202) para avisar en caso de que sea demasiado alta.

En la Tabla 53 se recogen los indicadores vinculados al reactor R-202.

Tabla 53. Indicadores asociados al reactor R-202

Instrumento	Identificador
Indicador de temperatura	TI-204
Indicador de composición	AI-203

8.7.18 Control de temperatura del intercambiador E-203: Lazo 270

El objetivo del intercambiador E-203 es análogo al E-202, salvo que enfría la entrada al reactor R-203. Por las mismas razones comentadas para E-202, se emplea un lazo de control *feedback* sencillo donde en función de la temperatura de salida se manipula el flujo del fluido refrigerante. [71]

En la Tabla 54 se recogen los instrumentos del lazo de control 270.

Tabla 54. Instrumentos del lazo de control 270

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-271
Controlador indicador de temperatura	TIC-271
Válvula de temperatura	TV-271

8.7.19 Control del reactor R-203 (LTS)

El reactor R-203 es análogo al R-202 con lo que, por las mismas razones no se emplea ningún lazo de control, si no que se monitoriza las condiciones de salida del mismo con los indicadores pertinentes, además de incluir una alarma de alta temperatura (TAH-203).

En la Tabla 55 se recogen los indicadores vinculados al reactor R-203.

Tabla 55. Indicadores asociados al reactor R-202

Instrumento	Identificador
Indicador de temperatura	TI-205
Indicador de composición	AI-204

8.7.20 Control de presión de descarga del compresor K-202: Lazo 280

Para controlar la presión de descarga del compresor se emplea un variador de velocidad del motor de la misma forma que para el compresor K-201.

El lazo de control empleado para este objetivo es un lazo *feedback* donde en función de la presión de descarga se regula la velocidad del compresor. [75]

En la Tabla 56 se numeran los instrumentos presentes en el lazo 280.

Tabla 56. Instrumentos del lazo de control 280

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	PT-281
Controlador indicador de presión	PIC-281
Controlador de velocidad	SC-281

8.7.21 Control de flujo mínimo del compresor K-202: Lazo 290

Debido a que todo compresor necesita un caudal mínimo para funcionar, se coloca una recirculación que garantice dicho flujo. La recirculación presenta una válvula de apertura rápida que se abrirá en el caso de alcanzarlo. De esta forma se evita el mal funcionamiento del compresor sin aumentar los costes de bombeo. [75]

En la Tabla 57 se numeran los instrumentos del lazo 290.

Tabla 57. Instrumentos del lazo de control 290

Instrumento	Identificador
Transmisor de flujo	FT-291
Interruptor de bajo flujo	FSL-291
Válvula manual	HV-291

8.7.22 Control de temperatura del intercambiador E-301: Lazo 310

Debido a que el objetivo del intercambiador E-201 es enfriar y condensar parcialmente la corriente de salida del reactor E-203 para la posterior separación del condesado en el tanque S-301 se debe controlar su temperatura de salida.

Por ello, se emplea un lazo de control *feedback* sencillo donde en función de dicha temperatura se manipula el flujo del fluido refrigerante. [71]

En la Tabla 58 se recogen los elementos del lazo de control 310.

Tabla 58. Instrumentos del lazo de control 310

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-311
Controlador indicador de temperatura	TIC-311
Válvula de temperatura	TV-311

8.7.23 Control de presión del separador de condensados S-301: Lazo 320

Este equipo se trata de un tanque lleno con un sistema bifásico líquido vapor a presión. Por ello, es necesario controlarla para evitar el riesgo de sobrepresión o que se alteren las condiciones de operación.

El lazo de control empleado es un lazo *feedback* con el cual se manipula el flujo de la salida gaseosa por las mismas razones que las descritas para otros recipientes a presión. [71]

En la Tabla 59 se listan los instrumentos pertenecientes al lazo de control 320.

Tabla 59. Instrumentos del lazo de control 320

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	LT-321
Controlador indicador de presión	LIC-321
Válvula de presión	LV-321

8.7.24 Control de nivel del separador de condensados S-301: Lazo 330

El separador de condensados S-301 es un tanque a presión parcialmente lleno de líquido. Debido a que si se vacía o se llena creará problemas en la operación y/o una situación de peligro, es necesario controlar el nivel.

El sistema de control empleado es un lazo *feedback* sencillo donde el nivel se controla regulando el flujo de caudal del producto líquido. [71]

En la Tabla 60 se recogen los elementos pertenecientes al lazo de control 330.

Tabla 60. Instrumentos del lazo de control 330

Instrumento	Identificador
Transmisor de nivel	LT-331
Controlador indicador de nivel	LIC-331
Válvula de nivel	LV-331

8.7.25 Control de presión de descarga del compresor K-301: Lazo 340

Debido a que el compresor K-301 es análogo al K-201 y al K-202 se emplea la misma estrategia para controlar la presión de descarga.

Por ello, el lazo de control empleado para este objetivo es un lazo *feedback* donde en función de la presión de descarga se regula la velocidad del compresor. [75]

En la Tabla 61 se numeran los instrumentos presentes en el lazo 340.

Tabla 61. Instrumentos del lazo de control 340

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	PT-341
Controlador indicador de presión	PIC-341
Controlador de velocidad	SC-341

8.7.26 Control de flujo mínimo del compresor K-301: Lazo 350

De forma análoga a los compresores K-201 y K-202, para proteger el compresor K-301 de una condición de caudal bajo, se emplea una recirculación controlada por una válvula de apertura rápida. [75]

En la Tabla 62 se numeran los instrumentos del lazo 350.

Tabla 62. Instrumentos del lazo de control 350

Instrumento	Identificador
Transmisor de flujo	FT-351
Interruptor de bajo flujo	FSL-351
Válvula manual	HV-351

8.7.27 Control de temperatura del intercambiador E-302: Lazo 360

El objetivo de este intercambiador es refrigerar la salida del compresor K-301 hasta la temperatura de operación de la columna C-301.

Por ello, se emplea un lazo de control *feedback* en el cual se manipula el caudal de fluido refrigerante para garantizar la temperatura de entrada a C-301 correcta. [71]

En la Tabla 63 se recogen los elementos del lazo de control 360.

Tabla 63. Instrumentos del lazo de control 360

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-361
Controlador indicador de temperatura	TIC-361
Válvula de temperatura	TV-361

8.7.28 Control de presión de la columna de absorción C-301: Lazo 370

La columna de absorción C-301 es un recipiente a presión, la cual hay que controlar de la misma forma que para la columna C-201 anteriormente descrita.

El lazo de control es un lazo *feedback* donde la presión se controla manipulando el flujo de la salida gas (producto sin CO₂). [71]

En la Tabla 64 se recogen los instrumentos del lazo de control 370.

Tabla 64. Instrumentos del lazo de control 370

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	LT-371
Controlador indicador de presión	LIC-371
Válvula de presión	LV-371

8.7.29 Control de nivel de la columna de absorción C-301: Lazo 380

Por las mismas razones que para la columna C-101 se debe controlar el nivel de dicho equipo.

Por ello, se coloca un lazo de control *feedback* sencillo, con el cual se controla el nivel de la columna C-101 manipulando el caudal de salida líquida (amina rica). [71]

En la Tabla 65 se listan los instrumentos asociados al lazo de control 380.

Tabla 65. Instrumentos del lazo de control 380

Instrumento	Identificador
Transmisor de nivel	LT-381
Controlador indicador de nivel	LIC-381
Válvula de nivel	LV-381

8.7.30 Control de presión de la columna de desorción C-302: Lazo 390

Es de vital importancia controlar la presión de la columna C-302 debido a que es un recipiente a presión y existe peligro de explosión y para mantener las condiciones de operación requeridas.

De forma análoga a la columna C-201, el producto de cabezas está formado por no condensables (CO₂), con lo que la presión de la columna va responder rápidamente a cambios en su caudal. Por ello, se elige un control *feedback* sencillo donde en función de la presión de la columna se manipula el flujo de CO₂ producido. [71]

En la Tabla 66 se recogen los instrumentos asociados al lazo de control 390.

Tabla 66. Instrumentos del lazo de control 390

Instrumento	Identificador
Transmisor de presión	PT-391
Controlador indicador de presión	PIC-391
Válvula de control	PV-391

8.7.31 Control de nivel del separador de condensados S-302: Lazo 3100

De forma análoga al separador de condensados S-101, se procede a controlar el nivel de dicho equipo empleando un lazo de control *feedback* sencillo, manipulando el poder enfriador del condensador E-306. [71]

En la Tabla 67 se recogen los instrumentos del lazo 3100.

Tabla 67. Instrumentos del lazo de control 3100

Instrumento	Identificador
Transmisor de nivel	LT-3101
Controlador indicador de nivel	LIC-3101
Válvula de control	LV-3101

8.7.32 Control de temperatura de la parte inferior de la columna de desorción C-302: Lazo 3110

Para controlar la temperatura de la parte inferior del desorbedor C-302 se emplea el mismo sistema de control que el empleado en C-101.

Según la variación de la temperatura de la parte inferior de la columna C-302 se manipula el flujo de fluido térmico alimentado al *reboiler* E-304. [71]

En la Tabla 68 se recogen los instrumentos pertenecientes al lazo 3110.

Tabla 68. Instrumentos del lazo de control 3110

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-3111
Controlador indicador de temperatura	TIC-3111
Válvula de temperatura	TV-3111

8.7.33 Control de nivel de la columna de desorción C-302: Lazo 3120

De igual forma que para otros recipientes con presencia de líquido y de vapor, se procede a controlar el nivel de la columna C-302.

Para el control del nivel se emplea un lazo *feedback* sencillo donde se manipula el flujo de líquido que sale por la parte inferior del desorbedor C-302. [71]

En la Tabla 69 se listan los instrumentos del lazo 3120.

Tabla 69. Instrumentos del lazo de control 3120

Instrumento	Identificador
Transmisor de nivel	LT-3121
Controlador indicador de nivel	LIC-3121
Válvula de control	LV-3121

8.7.34 Control de nivel del *reboiler* E-304: Lazo 3130

El *reboiler* E-304 es un equipo a presión con dos fases, con lo que es necesario colocar un sistema de control de nivel.

Para ello, se utiliza un lazo de control *feedback* sencillo donde se manipula el caudal del producto de colas. [71]

En la Tabla 70 se listan los instrumentos presentes en el lazo 3130.

Tabla 70. Instrumentos del lazo de control 3130

Instrumento	Identificador
Transmisor de nivel	LT-3131
Controlador indicador de nivel	LIC-3131
Válvula de control	LV-3131

8.7.35 Control de flujo de la bomba P-301 A/B: Lazo 3140

Para mantener el flujo de líquido deseado que es proporcionado por la bomba P-301 A/B se emplea un sistema de control basado en una recirculación a la misma. El funcionamiento consiste en variar el caudal de dicha recirculación para mantener el caudal buscado constante. [74]

En la Tabla 71 se recogen los elementos pertenecientes al lazo 3140.

Tabla 71. Instrumentos del lazo de control 3140

Instrumento	Identificador
Transmisor de flujo	FT-3141
Controlador indicador de flujo	FIC-3141
Válvula de flujo	FV-3141

8.7.36 Control de temperatura del intercambiador E-305: Lazo 3150

La corriente pobre procedente del desorbedor C-302 debe ser enfriada hasta la temperatura requerida por el absorbedor C-301. Por ello, es necesario controlar el poder enfriador del intercambiador E-305.

El lazo de control consiste en un lazo *feedback* sencillo donde se manipula el caudal de fluido refrigerante de E-305 en función de la temperatura de la corriente líquida alimentada en la parte superior de C-301. [71]

En la Tabla 72 se numeran los elementos del lazo 3150.

Tabla 72. Instrumentos del lazo de control 3150

Instrumento	Identificador
Transmisor de temperatura	TT-3151
Controlador indicador de temperatura	TIC-3151
Válvula de control	TV-3151

8.7.37 Control de PSA: Lazo 3160

El sistema de control de la etapa de purificación PSA se encarga de coordinar los diferentes flujos de gas de un lecho al otro siguiendo las etapas descritas en el apartado 7 de la Memoria, relativo a la descripción de los equipos.

En concreto, utiliza un controlador lógico programable XIC-3161 capaz de abrir y cerrar las válvulas XV-3161 de la A a la S mediante un sistema temporizado y la utilización de interruptores.

En la Tabla 73 se numeran los instrumentos que intervienen en el control de PSA.

Tabla 73. Instrumentos de PSA

Instrumento	Identificador
Controlador indicador de PSA	XIC-3161
Válvulas de control de PSA	XV-3161 A/S

8.8 Sistemas de alivio y alarmas

Para garantizar la integridad de los distintos equipos a presión frente a presiones anormalmente elevadas se emplean dispositivos de alivio, los cuales son elementos de seguridad.

En la Tabla 74 se listan todas las válvulas de alivio designadas a tal efecto.

Tabla 74. Sistemas de alivio instalados en los recipientes a presión

Instrumento	Identificador
Válvula de alivio de C-101	PSV-101
Válvula de alivio de E-101	PSV-102
Válvula de alivio de E-103	PSV-103
Válvula de alivio de C-102	PSV-104
Válvula de alivio de E-104	PSV-105
Válvula de alivio de S-101	PSV-106
Válvula de alivio de E-102	PSV-107
Válvula de alivio de R-201	PSV-201
Válvula de alivio de E-202	PSV-202
Válvula de alivio de R-202	PSV-203
Válvula de alivio de E-203	PSV-204
Válvula de alivio de R-203	PSV-205
Válvula de alivio de E-301	PSV-301
Válvula de alivio de S-301	PSV-302
Válvula de alivio de E-302	PSV-303
Válvula de alivio de C-301	PSV-304
Válvula de alivio de E-303	PSV-305
Válvula de alivio de E-305	PSV-306
Válvula de alivio de C-302	PSV-307
Válvula de alivio de E-306	PSV-308
Válvula de alivio de S-302	PSV-309
Válvula de alivio de E-304	PSV-3010
Válvula de alivio de C-303	PSV-3011
Válvula de alivio de C-304	PSV-3012
Válvula de alivio de C-305	PSV-3013
Válvula de alivio de C-306	PSV-3014

Además de ello, en el presente proceso hay una serie de alarmas cuyo objetivo es avisar de una posible incidencia en las unidades más críticas que puedan provocar una situación de gran peligro. Por ello, se consideran apropiadas para indicar la existencia de sobrepresión y nivel anormalmente alto (en aquellas que presenten una fase líquida), problemas que pueden causar la rotura catastrófica de dichos equipos, además de otras de alta temperatura en los reactores. A continuación, en la Tabla 75 se describen todas las presentes.

Tabla 75. Sistemas de alarmas presentes

Instrumento	Identificador
Alarma de nivel alto de C-101	LAH-101
Alarma de presión alta de C-101	PAH-101
Alarma de nivel alto de C-102	LAH-102
Alarma de presión alta de C-102	PAH-102
Alarma de flujo bajo	FAL-241
Alarma de relación de flujo bajo	FFAL-241
Alarma de presión alta de R-201	PAH-201
Alarma de temperatura alta de R-201	TAH-201
Alarma de presión alta de R-202	PAH-202
Alarma de temperatura alta de R-202	TAH-202
Alarma de presión alta de R-203	PAH-203
Alarma de temperatura alta de R-203	TAH-203
Alarma de nivel alto de C-301	LAH-301
Alarma de presión alta de C-301	PAH-301
Alarma de nivel alto de C-302	LAH-302
Alarma de presión alta de C-302	PAH-302
Alarma de presión alta de C-303	PAH-303
Alarma de presión alta de C-304	PAH-304
Alarma de presión alta de C-305	PAH-305
Alarma de presión alta de C-306	PAH-306

8.9 Otros indicadores

Además de la instrumentación ya descrita, es necesario colocar una serie de indicadores para poder realizar el seguimiento de otras variables de proceso importantes, como por ejemplo la composición del hidrógeno producido.

En la Tabla 76 se listan todos los indicadores presentes en la planta no mencionados con anterioridad.

Tabla 76. Otros indicadores presentes en el proceso

Instrumento	Identificador
Indicador de flujo de gas natural alimentado	FI-101
Indicador de flujo de vapor de agua de C-102	FI-102
Indicador de composición de la salida desulfurada	AI-201
Indicador de composición de salida libre de CO ₂ de C-301	AI-301
Indicador de flujo de vapor de agua de C-302	FI-301
Indicador de flujo de hidrógeno producido	FI-302
Indicador de composición de hidrógeno producido	AI-302
Indicador de flujo de fuel-gas producido	FI-303

9. SEGURIDAD Y SALUD

Además del Estudio Básico de Seguridad y Salud (que se recoge en el Documento III. Estudios con entidad propia), se realizará un estudio de diferentes aspectos de seguridad relativos a la planta.

De este modo, se estudiarán los riesgos inherentes a los productos químicos y materiales manejados en la instalación, y cómo se encuentra afectada la planta por la Directiva Seveso III, entre otros aspectos.

Finalmente, combinando los peligros propios de las sustancias, y los peligros derivados de las instalaciones y de las condiciones de operación, se aplicará la metodología para el cálculo del índice DOW de incendio y explosión, para evaluar el riesgo de una de las unidades más importantes y peligrosas de la planta, el reformador R-201.

9.1 Sustancias peligrosas

Es imprescindible conocer los riesgos inherentes a los productos químicos y materiales que se manejan en la instalación. Para ello es necesario conocer las propiedades de las corrientes, la reactividad de las sustancias y su inflamabilidad; así como llevar a cabo estudios toxicológicos de productos químicos de proceso y productos químicos acabados, a fin de determinar los efectos de una posible exposición (ingestión, inhalación o contacto con la piel), tanto para los empleados como para los consumidores. Los datos se utilizan para elaborar información sobre la salud en relación con los límites de exposición permisibles o las cantidades de materiales peligrosos en los productos.

En el proceso del presente Trabajo Final de Grado se manejan una serie de sustancias peligrosas, como son el metano, el hidrógeno o el monóxido de carbono. En el Anexo V se recogen las fichas de seguridad correspondientes a las sustancias peligrosas que se manejan en la planta, advirtiéndose los principales riesgos, y recogiendo todos los datos que se mencionaron anteriormente.

9.2 Estudio básico de reactividad

No obstante, además de lo comentado en el apartado anterior, una forma sencilla y rápida de evaluar los peligros inherentes a una mezcla de sustancias es hacer uso del software *Chemical Reactivity Worksheet*, desarrollado por la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Las fichas que suministra el software contienen información sobre los peligros intrínsecos de cada producto químico (suministra el diamante de fuego, por ejemplo) y acerca de si cada uno de los productos considerados reacciona con el aire, el agua u otros materiales. Es especialmente útil para simular mezclas de productos químicos, para saber que peligros podrían surgir de una mezcla accidental. Permite, en definitiva, la realización de un estudio básico de la reactividad de las sustancias. Está disponible de forma gratuita en <http://response.restoration.noaa.gov/reactivityworksheet>. [76]

De este modo, se pueden generar los diamantes de fuego, según el código establecido por la NFPA (*National Fire Protection Association*), para las diferentes sustancias, los más relevantes se recogen en las Figuras 54, 55 y 56.

Chemical Name	CAS #	UN #	DOT Label
HYDROGEN	1333-74-0	1049	Flammable Gas
General Description	Reactive Group(s)	Reactivity Alert(s)	
Hydrogen is a colorless, odorless gas. It is easily ignited. Once ignited it burns with a pale blue, almost invisible flame. The vapors are lighter than air. It is flammable over a wide range of vapor/air	Reducing Agents	Highly Flammable; Strong Reducing Agent	

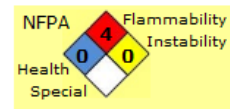


Figura 54. Diamante de fuego de la NFPA para el hidrógeno. Fuente: *Chemical Reactivity Worksheet*, disponible en [76]

Chemical Name	CAS #	UN #	DOT Label
METHANE	74-82-8	1971	Flammable Gas
General Description	Reactive Group(s)	Reactivity Alert(s)	
Methane is a colorless odorless gas. It is also known as marsh gas or methyl hydride. It is easily ignited. The vapors are lighter than air. Under prolonged exposure to fire or intense heat the	Hydrocarbons, Aliphatic Saturated	Highly Flammable; Strong Reducing Agent	

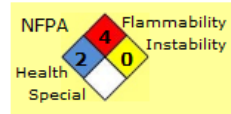


Figura 55. Diamante de fuego de la NFPA para el metano. Fuente: *Chemical Reactivity Worksheet*, disponible en [76]

Chemical Name	CAS #	UN #	DOT Label
CARBON MONOXIDE	630-08-0	1016	Poison Gas, Flammable Gas
General Description	Reactive Group(s)	Reactivity Alert(s)	
Carbon monoxide is a colorless, odorless gas. Prolonged exposure to carbon monoxide rich atmospheres may be fatal. It is easily ignited. It is just lighter than air and a flame can flash back to the	Reducing Agents	Highly Flammable	

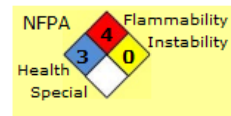


Figura 56. Diamante de fuego de la NFPA para el monóxido de carbono. Fuente: *Chemical Reactivity Worksheet*, disponible en [76]

El significado de los elementos del diamante de fuego para cualquier sustancia se puede observar en la Figura 57.



Figura 57. Elementos y significado del diamante de fuego. Fuente: [77]

Por otra parte, uno de los escenarios más peligroso que se plantean en relación a la reactividad de las sustancias consiste en una posible fuga de material. De producirse, las diferentes sustancias podrían reaccionar entre sí, dependiendo de las condiciones a las que se

produzca la fuga, y con otras sustancias con las que entren en contacto en el exterior, fundamentalmente el oxígeno atmosférico.

De este modo, mediante el *Chemical Reactivity Worksheet* desarrollado por la NOAA, podemos simular una de las peores fugas posibles de la planta, introduciendo en el software una mezcla de hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono y vapor de agua (simulación de una corriente de proceso entre los reactores R-201 y R-202, o entre el R-202 y el R-203, que además estarían a alta presión y temperatura) con aire. El software proporciona una respuesta como la mostrada en la Figura 58. En ella se marcan las compatibilidades o incompatibilidades entre diferentes sustancias.

<div><div>Y</div><div>N</div><div>C</div><div>SR</div></div>	: Compatible : Incompatible : Caution : Self-Reactive • : Changed by user									
NFPA				CO2+CO+H2+CH4 +O2+H2O Compatibility Chart	CARBON DIOXIDE	CARBON MONOXIDE	HYDROGEN	METHANE	OXYGEN	WATER
Health	Flammability	Instability	Special							
				CARBON DIOXIDE						
3	4	0		CARBON MONOXIDE	Y					
0	4	0		HYDROGEN	Y	C				
2	4	0		METHANE	Y	Y	Y			
3	0	0	5	OXYGEN	Y	N	N	N		
				WATER	Y	N	Y	Y	Y	

Figura 58. Matriz de incompatibilidades (Y=compatible, N=incompatible, C=precaución, SR=reactivo consigo mismo). Fuente: *Chemical Reactivity Worksheet*, disponible en [76]

Analizando alerta por alerta se tiene lo siguiente:

9.2.1 Hidrógeno y monóxido de carbono

- Pueden reaccionar bajo determinadas condiciones, liberando calor y generando productos inflamables.

9.2.2 Oxígeno y monóxido de carbono

- La reacción puede ser particularmente intensa, violenta o explosiva.
- La reacción pueden generar una onda de choque.
- La reacción puede dar lugar a atmósferas asfixiantes.
- Liberación de calor.
- Principal producto: dióxido de carbono.

9.2.3 Oxígeno e hidrógeno

- La reacción puede ser particularmente intensa, violenta o explosiva.
- La reacción puede generar una onda de choque.
- La reacción puede dar lugar a atmósferas asfixiantes.
- Muy alta liberación de calor.
- Principal producto: vapor de agua.

9.2.4 Oxígeno y metano

- La reacción puede ser particularmente intensa, violenta o explosiva.
- La reacción puede generar una onda de choque.
- La reacción puede dar lugar a atmósferas asfixiantes.
- Alta liberación de calor.
- Los productos de la reacción pueden ser inflamables.
- Los productos de la reacción pueden ser tóxicos.
- Principales productos: monóxido de carbono, dióxido de carbono y vapor de agua.

9.2.5 Agua y monóxido de carbono

- Liberación de calor.
- Los productos de reacción pueden ser corrosivos.
- Los productos de la reacción pueden ser inflamables.
- Los productos de la reacción pueden ser tóxicos.
- Principales productos: vapores ácidos e hidrógeno.

9.3 Aplicación de Seveso III

La Directiva 2012/18/UE, de 4 de julio de 2012, conocida comúnmente como Directiva Seveso III, es un reglamento que, a través las normas por las que se traspone la Directiva a los ordenamientos jurídicos nacionales, obliga a los países europeos a identificar las zonas con riesgos y a adoptar las medidas apropiadas para prevenir los accidentes graves en los que estén implicadas sustancias peligrosas y limitar sus consecuencias para el hombre y para el medioambiente. De este modo, se pretende garantizar de forma coherente y eficaz un nivel elevado de protección en toda la Unión Europea.

Las disposiciones de la nueva Directiva Seveso III comenzaron a aplicarse a partir del 1 de junio de 2015, a excepción de la modificación de la Directiva 96/82/CE (Seveso II) que afecta a la parte 1 del Anexo I que se hizo efectiva a partir del 14 de febrero de 2014.

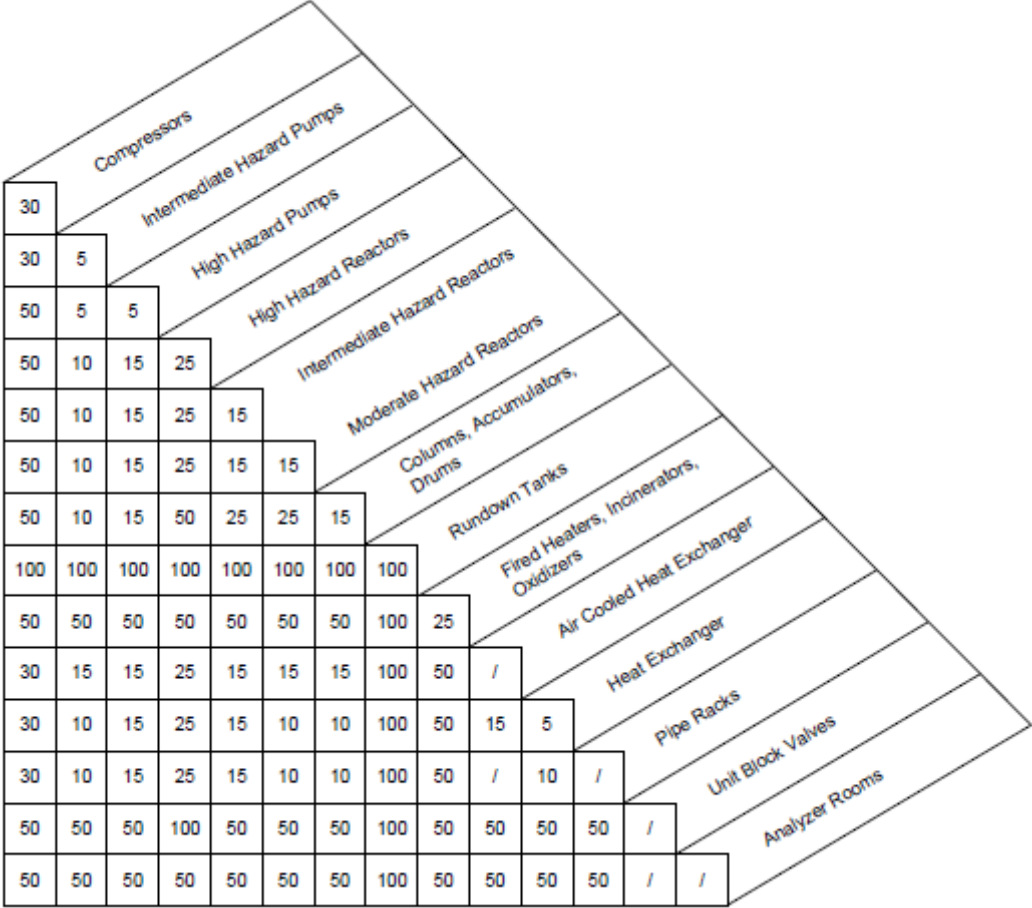
Precisamente en el Anexo I se establecen los criterios que cumplen las plantas que se clasifican como Seveso III, mediante la definición de unas determinadas cantidades umbrales de sustancias peligrosas. Se pueden distinguir dos cantidades umbrales para cada sustancia, con niveles de exigencia diferentes para las instalaciones en cuestión.

Para tener en cuenta algunas sustancias en la Directiva Seveso III puede ser necesario recurrir a la caracterización que tienen dichas sustancias en el Reglamento REACH, y para ello se necesita una ficha de seguridad que explice dicha clasificación. Es el caso del gas natural. En el Anexo V se incluye su ficha de seguridad.

En dicha ficha de seguridad se caracteriza al gas natural como extremadamente inflamable, clasificándose como un gas inflamable de categoría 1 con arreglo a lo establecido por el Reglamento CLP, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (Reglamento (CE) nº 1272/2008). Siendo un gas inflamable de categoría 1, toda instalación con más de 10 toneladas de gas natural será clasificada como Seveso III, siendo el umbral superior de 50 toneladas.

Por otra parte, el hidrógeno, del cual se recoge también su ficha de seguridad en el Anexo V, aparece explícitamente en el Anexo I de la Directiva. Se establece el umbral inferior en 5 toneladas, y el superior en 50 toneladas.

De este modo, considerando el alcance de este trabajo, y un almacenamiento de 15 días de requerimientos de materia prima y de una semana de almacenamiento de producto terminado, se tiene que las cantidades almacenadas de gas natural e hidrógeno ascienden a, aproximadamente, 3110 y 580 toneladas respectivamente.



/ = no existen requerimientos mínimos

Distancias en pies (1 ft = 0,305 m)

Figura 60. Distancias de seguridad entre equipos. Fuente: [78]

De forma que, por ejemplo, entre el reactor R-201 y el intercambiador de calor E-202 debe de haber una distancia mínima de seguridad de 25 pies (7,62 m); y entre el compresor K-301 y el intercambiador de calor E-302 debe de haber una distancia mínima de 30 pies (9,14 m).

Estas distancias de seguridad son imprescindibles para un diseño seguro de la instalación, garantizando también accesos cómodos a las unidades, de modo que permitan, por ejemplo, realizar operaciones de mantenimiento, o la circulación de vehículos entre las áreas si fuese necesario. Además son datos básicos para establecer el *layout* de la planta, para lo cual, además, sería necesario definir las dimensiones de todos los equipos de la instalación, las cuales no se determinan dado que el objeto del presente trabajo, en materia de diseño, se centra en el reformador R-201 y la columna de absorción C-301. De este modo, no se puede establecer el *layout* completo de la planta, con las distancias entre equipos, porque excede el alcance del presente trabajo. No obstante, como distribución global de la *planta de producción de hidrógeno por reformado de gas natural* se establece el *layout* de la Figura 61.

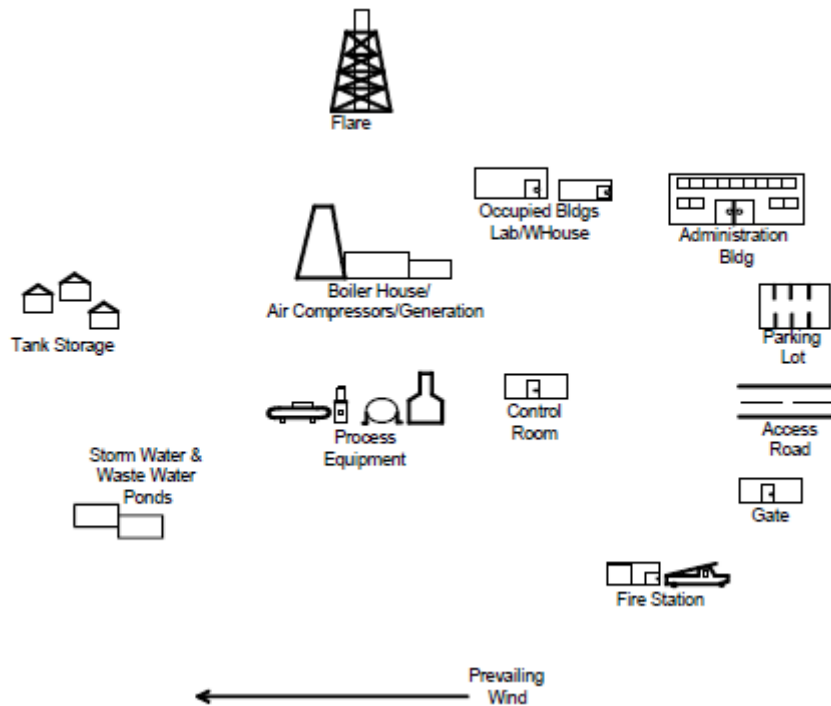


Figura 61. Propuesta de *layout* global de la instalación. Fuente: [79]

9.5 Identificación simple de escenarios de incidentes

En este apartado se realizará una identificación simple de escenarios de incidentes y peligros. En realidad debería de aplicarse un HAZOP exhaustivo a todo el proceso, para poder identificar todos los riesgos que puede tener el proceso, pero no entra en el alcance este trabajo.

Una de las unidades críticas en cuanto a seguridad y operación de la planta es el reformador R-201. En la operación de dicha unidad se podrían distinguir la implicación de dos nodos diferenciados: la corriente de proceso y el circuito de combustible que alimenta al reformador. En las Tablas 77 y 78 se plantean algunos de los posibles escenarios que podrían presentarse en la instalación.

Tabla 77. Identificación de riesgos relacionados con la temperatura y la presión en el nodo 1.

NODO 1		Calentamiento y reacción de la corriente de proceso a través del reformador R-101			
PALABRA GUÍA	VARIABLE	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDAS	RECOMENDACIONES
Más	Temperatura	1.- Fallo del indicador de temperatura TI-203.	1.1.- Temperatura de operación errónea. Alteraciones en el proceso de reacción.	1.1.1.- Alarma TAH-201 por alta temperatura en el interior del reformador	1.- Instalar un indicador redundante para posibilitar la regulación del flujo de combustible (HV-201) evitando la actuación del sistema de alarma.
		2.- Bajo caudal de producto a través del horno.	2.1.- Temperatura de operación errónea. Alteraciones en el proceso de reacción.	2.1.1.- El TI-203 detectaría la desviación y un operario manipularía en consecuencia la HV-201	
		3.- Cambio en la composición del combustible.	3.1.- Temperatura operación errónea. Alteraciones en el proceso de reacción.	3.1.1.- El TI-203 detectaría la desviación y un operario manipularía en consecuencia la HV-201.	
	Presión	4.- Obstrucción en tubos del R-201.	4.1.- Ruptura de algún tubo dentro del R-201.	4.1.1.- Ninguna	2.- Instalación de alarmas de alta presión en los tubos del R-201.

Tabla 77 (Continuación). Identificación de riesgos relacionados con la temperatura y la presión en el nodo 1.

NODO 1		Calentamiento y reacción de la corriente de proceso a través del reformador R-101			
PALABRA GUÍA	VARIABLE	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDAS	RECOMENDACIONES
Menos	Temperatura	5.- Fallo del indicador de temperatura TI-203.	5.1.- Temperatura de operación errónea. Alteraciones en el proceso de reacción.	5.1.1.- Ninguno	3.- Instalación de alarmas de baja temperatura en la línea de salida de la corriente de proceso.
		6.- Fallo en la alimentación del gas combustible.	6.1.- Temperatura de operación errónea. Alteraciones en el proceso de reacción.	6.1.1.-Ninguno	4.- Instalación de sistemas de alimentación de combustible redundantes
		7.- Empobrecimiento en el poder energético del fuel gas	7.1.- Temperatura de operación errónea. Alteraciones en el proceso de reacción.	7.1.1.- El TI-203 detectaría la desviación y un operario manipularía en consecuencia el caudal de combustible (HV-201). 7.1.2.- Circuito de gas natural como combustible de apoyo	
	Presión	8.-Rotura de un tubo dentro del horno.	8.1.- Fuego incontrolado dentro del horno	8.1.1.- Ninguna	5.- Instalación de un control diferencial de flujo entre la entrada y la salida del horno conectado a un sistema de alarma.

Tabla 78. Identificación de riesgos en el nodo 2.

NODO 2		Sistema de gas combustible del reformador R-101			
PALABRA GUÍA	VARIABLE	CAUSAS	CONSECUENCIAS	SALVAGUARDAS	RECOMENDACIONES
Más	Caudal	1.- Fallo del indicador de flujo de combustible FI-201.	1.1.-Aumento de temperatura en la salida de la corriente de proceso del reformador R-201.	1.1.1.- Indicador de temperatura TI-203. 1.1.2.- Válvula HV-201. 1.1.3.- Sistema de alarma por alta temperatura, TAH-201.	
Menos	Caudal	2.- Falta de gas natural de apoyo por problemas externos de la instalación.	2.1.- Bajada de presión en línea de entrada a quemadores con posibilidad de apagarse.	2.1.1.- Ninguna	1.- Valorar la posibilidad de operar con combustibles alternativos.
		3.- Fallo del indicador de temperatura TI-203.	3.1.- Bajada de presión en línea de entrada a quemadores con posibilidad de apagarse.	3.1.1.- Ninguna	2.- Instalación de un control de presión en la línea de combustible.
		4.- Manipulación errónea de la HV-201	4.1.- Bajada de presión en línea de entrada a quemadores con posibilidad de apagarse.	4.1.1.- Ninguna	
	Presión	5.- Falta de gas natural de apoyo por problemas externos de la instalación.	5.1.- Apagado de los quemadores	1.- Ninguna	3.- Valorar la posibilidad de operar con combustibles alternativos.
Otra	Composición	1.- Modificación de la corriente procedente de la red de suministro de combustible.	1.- Modificación de la forma y capacidad calorífica de la llama, pudiendo afectar negativamente a la integridad de los tubos.	1.- Ninguna	1.- Instalación de analizador en línea en la corriente de combustible.

9.6 Índice DOW de incendio y explosión

Mediante este sistema de análisis de riesgos, se puede evaluar cualquier operación donde un material inflamable, combustible o reactivo se almacene, maneje o trate, con excepción de las instalaciones generadoras de energía, edificios de oficinas o sistemas de tratamiento o distribución de agua. Para llevar a cabo el análisis se sigue lo establecido por la Guía Mapfre. [80]

Tabla 79. Índice DOW de incendio y explosión


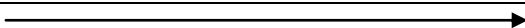
ÍNDICE DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN	Localización: Polígono industrial de A Sionlla (A Coruña)	Fecha: 16/05/16
Planta: Planta de producción de H ₂ por reformado de gas natural	Unidad: Reformador R-201	A cargo de: Alejandro Ferraces Azcunaga Óscar López Gestoso
Materiales y procesos		
Materiales: AISI A 608 HK40		
Catalizadores: Níquel sobre alúmina		
FACTOR MATERIAL (FM)		21
1. RIESGOS GENERALES DEL PROCESO	Penalización	Penalización usada
FACTOR BASE 	1,00	1,00
A. Reacciones exotérmicas (Factor 0,30 a 1,25)		-
B. Reacciones endotérmicas (Factor 0,20 a 0,40)		0,4
C. Transferencia y manejo de materiales (Factor 0,25 a 0,85)		-
D. Unidades de proceso cerradas (Factor 0,30 a 0,90)		-
E. Acceso		-
F. Desagües (Factor 0,25 a 0,50)		-
FACTOR DE RIESGOS GENERALES DEL PROCESO (F ₁) 		1,40
2. RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO		
FACTOR BASE 	1,00	1,00
A. Temperatura del proceso (Usar sólo una)		
a. Superior al punto de inflamación	0,30	-
b. Superior al punto de ebullición	0,60	-
c. Superior al punto de autoignición	0,75	0,75
B. Presión baja (Inferior a la atmosférica)	0,50	-
C. Operación en o cerca de condiciones de inflamabilidad		-

Tabla 79 (Continuación). Índice DOW de incendio y explosión

a. Líquidos inflamables almacenados en tanques en el exterior	0,50	-
b. Alteración del proceso o fallo de purga	0,30	0,30
c. Siempre en condiciones de inflamabilidad	0,80	-
D. Explosión de polvo (Factor 0,25 a 2,00)		-
E. Presión		0,22
F. Temperatura baja (Factor 0,20 a 0,50)		-
G. Cantidad de material inflamable		-
a. Líquidos o gases en procesos		0,16
b. Líquidos o gases almacenados		-
c. Sólidos combustibles almacenados		-
H. Corrosión y erosión (Factor 0,10 a 0,75)		0,10
I. Fugas por uniones y empaquetaduras (Factor 0,10 a 1,50)		-
J. Uso de calentadores con llama abierta (Factor 0,10 a 1,00)		0,90
K. Sistema de intercambio térmico con aceite caliente (Factor 0,15 a 1,5)		-
L. Compresores, bombas y equipos rotativos	0,50	0,50
FACTOR DE RIESGOS ESPECIALES DEL PROCESO (F_2) \longrightarrow		3,93
FACTOR DE RIESGO DE LA UNIDAD ($F_1 \times F_2 = F_3$) \longrightarrow		5,50
ÍNDICE DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN ($F_3 \times FM$) = IIE \longrightarrow		115,50

A continuación se explicarán los factores asignados a cada uno de los apartados de la Tabla 79.

Los productos que se manejan en la unidad con un factor de material más elevado, a la temperatura de operación, según se especifica en la Guía Mapfre, son el hidrógeno y el metano, ambos con un factor material de 21.

Las reacciones que tienen lugar en el reformador son, en conjunto, endotérmicas. Estas reacciones se penalizan con un factor de 0,2, excepto en casos como el del reformador R-201, en dónde la energía se aporta por combustión de un sólido, líquido o gas, dónde la penalización es de 0,4.

Como no se trata de una operación en discontinuo, no se consideran penalizaciones por transferencia y manejo de materiales. Asimismo, como se trata de un equipo de grandes

dimensiones, se localiza en el exterior, no existiendo penalizaciones por unidad de proceso cerrada.

Como se puede observar en las fichas de seguridad recogidas en el Anexo V, la temperatura de operación del reformador (880 °C) es superior a la temperatura de autoignición, tanto del hidrógeno (560 °C) como del metano (595 °C). Por lo tanto, le corresponde una penalización del 0,75.

Se trabaja a altas presiones, por lo que no existen riesgos relacionados con la operación a vacío. Por otra parte, el sistema puede encontrarse en condiciones de inflamabilidad en caso de fallo del equipo, por lo que se debe de aplicar, al menos, una penalización de 0,30.

En esta unidad no se manejan sólidos pulverulentos, por lo que no existe penalización por riesgo de explosión de polvo.

La penalización por presión se determina por medio de la figura 2 de la Guía Mapfre, que se recoge en la Figura 62 del presente documento. En ella presenta una gráfica que relaciona la presión de tarado de la válvula de alivio del equipo con la penalización.

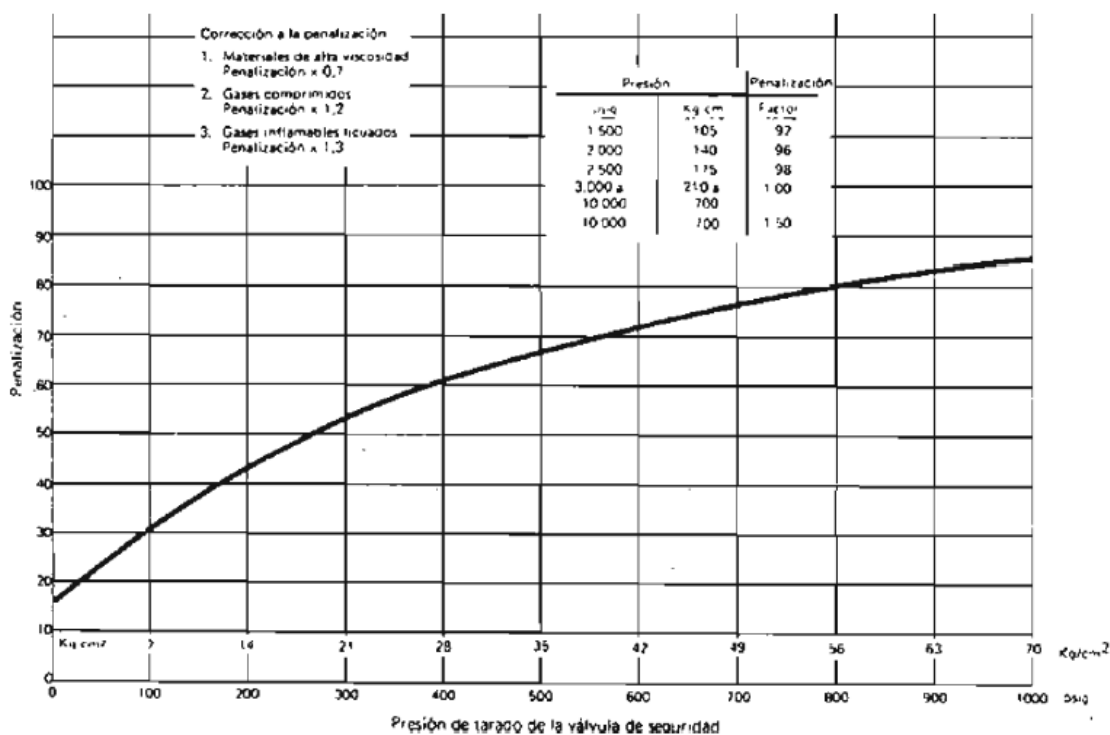


Figura 62. Factor de penalización para la presión de tarado de la válvula de seguridad. Fuente: [80]

La gráfica se plantea inicialmente para líquidos inflamables o combustibles, por lo que para aplicarlo al caso de gases a presión, se debe multiplicar el resultado por 1,2. Se obtiene de

este modo una penalización de 0,22, si se fija la presión de tarado en 2,1 bar (aproximadamente 16 psig).

Se trabaja a altas temperaturas, por lo que no se aplica penalización por bajas temperaturas.

En cuanto a la cantidad de material inflamable, los tubos del reactor presentan un volumen total de 9857 L, rellenos de un lecho con una porosidad del 57% por lo que el volumen de gas que pueden contener es de 5618 L, aproximadamente 1277 moles, a las condiciones de operación. Mediante la Figura 63 se puede estimar el factor de penalización correspondiente.

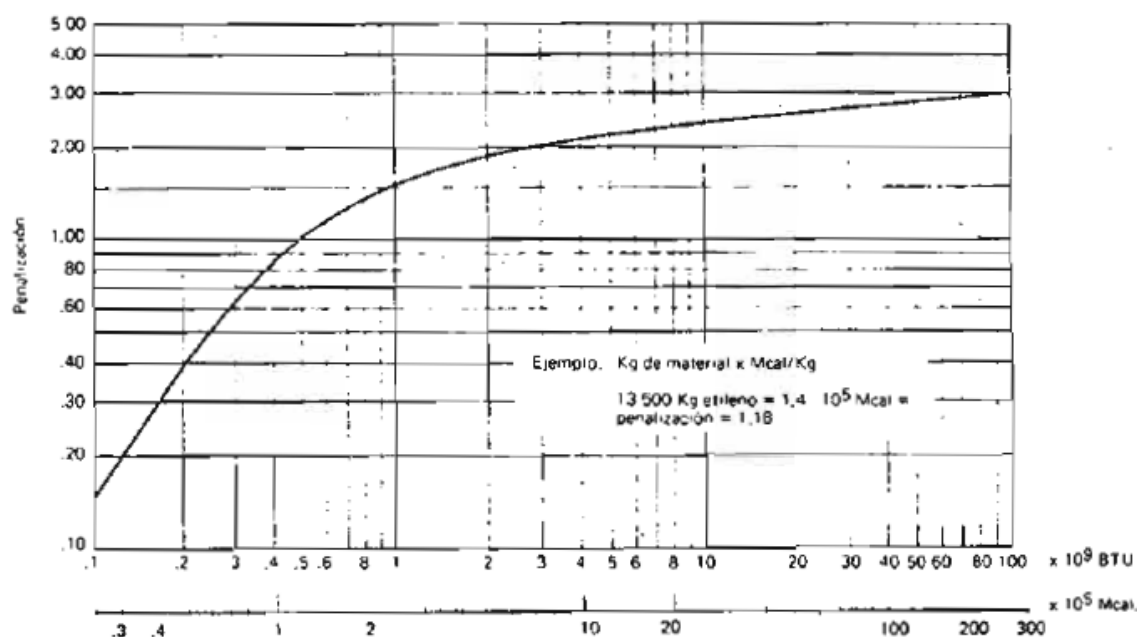


Figura 63. Factor de penalización para líquidos o gases combustibles. Fuente: [80]

La energía contenida en los productos combustibles no supera los $1 \cdot 10^8$ BTU, por lo que el factor de penalización para este apartado es de 0,16.

En cuanto a la penalización por corrosión, el factor de penalización depende de la velocidad de corrosión. El material seleccionado para la fabricación del horno pretende conseguir una protección contra la corrosión completamente satisfactoria, lo cual implica velocidades de corrosión inferiores a 0,5 mm/año. Por lo tanto el factor de penalización a aplicar es de 0,10.

En principio no se considera penalización debido a fugas.

Los quemadores del reformador se encuentran próximos a los tubos por los que circula el fluido de proceso, por lo que se considera una penalización de 0,9 para este apartado. Por otra parte, no existe sistema de intercambio térmico con aceite de calefacción, por lo que no se plantean penalizaciones al respecto.

En cuanto a la presencia de equipos de rotación como bombas o compresores, se debe aplicar una penalización de 0,5 ante la presencia de bombas de más de 75 c.v. o compresores de 600 c.v. La unidad de proceso que sigue al reformador R-201 se trata de un compresor centrífugo de 626 kW (aproximadamente 839 c.v.), por lo que convendría considerar dicha penalización.

De este modo, como se puede ver en la Tabla 79, se tiene un índice de incendio y explosión para el reformador R-201 de 115,5; lo cual supone un grado de peligro intermedio, según la Tabla 80.

Tabla 80. Grado de peligro en función del índice de incendio y explosión. Fuente: [80]

Índice de incendio y explosión	Grado de peligro
1-60	Bajo
61-96	Moderado
97-127	Intermedio
128-158	Intenso
>159	Grave

A partir del valor del índice de incendio y explosión se pueden estimar otros parámetros útiles desde el punto de vista de la seguridad.

Se puede estimar el área de exposición que se verá implicada como resultado de un incendio y/o explosión de una mezcla combustible como resultado de los efectos combinados del factor de riesgo de la unidad y el factor material especificado. Para ello se emplea la Figura 64.

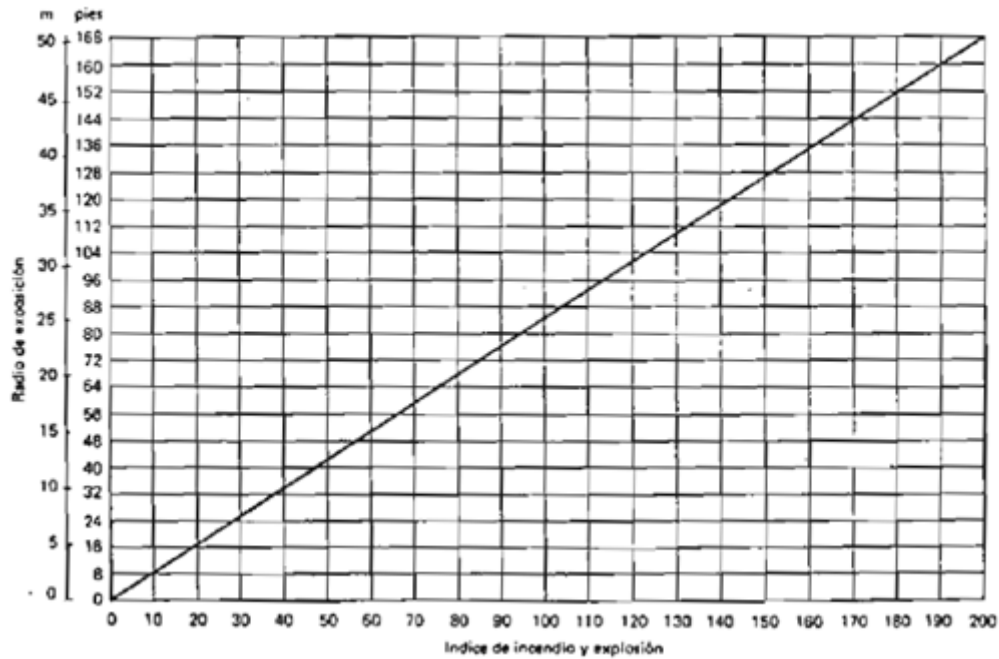


Figura 64. Gráfico para la determinación del radio de exposición. Fuente: [80]

De esta forma se tiene un radio de exposición de 97 ft o 29,57 m, y consecuentemente, un área circular de 2747 m².

10. NORMATIVA DE APLICACIÓN

10.1 Normativa de aplicación referente a la construcción de la instalación

10.1.1 Legislación europea

- Directiva 2005/36/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de septiembre de 2005, relativa al reconocimiento de cualificaciones profesionales.
- Directiva 2010/32/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios.
- Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE.

10.1.2 Legislación nacional

- R.D. 1837/2008, de 8 de noviembre, por la que se incorporan al ordenamiento jurídico español la Directiva 2005/36/CE, relativa al reconocimiento de cualificaciones profesionales.
- R.D. 1942/1993, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios.
- Ley 8/1980, Ley 32/1984 y Ley 11/1994, que conforman el Estatuto de los Trabajadores.
- Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación.
- R.D. 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.
- Ley 32/2006, de 18 de octubre, reguladora de la subcontratación en el Sector de la Construcción.
- R.D. 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Modificado por el R.D. 1371/2007, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico “DB-HR Protección frente al ruido” del Código Técnico de la Edificación.
- R.D. 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.
- R.D. 1644/2008, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas.
- R.D. 56/2016, de 12 de febrero, por el que se transpone la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, en lo referente a auditorías energéticas, acreditación de proveedores de servicios y auditores energéticos y promoción de la eficiencia del suministro de energía.

10.2 Normativa de aplicación referente a seguridad y salud

10.2.1 Legislación europea

- Directiva 89/656/CEE del Consejo, de 30 de noviembre de 1989, relativa a las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores en el trabajo de equipos de protección individual.

- Directiva 92/58/CEE del Consejo, de 24 de junio de 1992, relativa a las disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y de salud en el trabajo.
- Directiva 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 1999, relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas.
- Directiva 2003/10/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de febrero de 2003, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (ruido).
- Reglamento (CE) nº 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo del 18 de diciembre del 2006, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).
- Reglamento (CE) nº 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas. (Reglamento CLP)
- Directiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas y por la que se modifica y ulteriormente deroga la Directiva 96/82/CE. (Directiva Seveso III).

10.2.2 Legislación nacional

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales.
- R.D. 2200/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de la infraestructura para la Calidad y la Seguridad Industrial. Modificado por el R.D. 411/1997 y por el R.D. 338/210.
- R.D. 39/1997, de 17 de enero, pro el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención. Modificado por el R.D. 780/1998.
- R.D. 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.
- R.D. 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- R.D. 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.

- R.D. 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.
- R.D. 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se establecen disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.
- R.D. 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- R.D. 614/2001, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
- Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la prevención de riesgos laborales.
- R.D. 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.
- R.D. 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas.
- R.D. 286/2006, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- R.D. 1299/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro.
- R.D. 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia.
- R.D. 559/2010, de 7 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento del Registro Integrado Industrial.
- R.D. 8/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley General de la Seguridad Social.
- R.D. 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

10.3 Normativa de aplicación referente a medio ambiente.

10.3.1 Legislación europea

- Directiva 91/271/CEE, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Modificada por la Directiva 98/15/CEE, de 27 de febrero.⁷
- Reglamento (CE) nº 761/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de marzo de 2001, por el que se permite que las organizaciones se adhieran con carácter voluntario a un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS).
- Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación).
- Directiva 2011/92/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2011, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.

10.3.2 Legislación nacional

- R.D. 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.
- R.D. 1997/1995, de 7 de diciembre, por el que se establecen medidas para contribuir a garantizar la biodiversidad mediante la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres.
- R.D. 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido.
- R.D. 606/2003, de 23 de mayo, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril.
- R.D. 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- R.D. 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

- Ley 6/2010, de 24 de marzo, de modificación del texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero.
- R.D. 101/2011, de 28 de enero, por el que se establecen las normas básicas que han de regir los sistemas de acreditación y verificación de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- R.D. 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.
- R.D. 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.

10.3.3 Legislación autonómica

- Decreto 442/1990, de 13 de septiembre, de evaluación del impacto ambiental para Galicia.
- Decreto 295/2000, de 21 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 1/1995, de 2 de enero, de protección ambiental de Galicia, en relación con el pacto ambiental en la Comunidad Autónoma de Galicia.
- Decreto 133/2008, de 12 de junio, por el que se regula la evaluación de incidencia ambiental.
- Ley 9/2010, de 4 de noviembre, de aguas de Galicia.
- Decreto 106/2015, de 9 de julio, sobre contaminación acústica de Galicia.

10.4 Normas técnicas y códigos de diseño

10.4.1 Referentes a bombas y compresores

- API St. 610. Tests en bombas centrífugas. DIN 1944.
- Datos y construcción de bombas centrífugas. DIN 24293.
- Bombas y unidades de bombeo de líquidos. Métodos de Seguridad. DIN 24295.
- Pruebas de bombas. ASME PTE.
- Inspecciones ASME V.
- Compresores de proceso, API 618.
- Materiales según norma ASME sección VIII y ASTM.

10.4.2 Referentes a intercambiadores de calor

- Normas TEMA (*American Tubular Manufacturer Association*).
- Diseño mecánico, fabricación, materiales de construcción y pruebas. *British Standards*, BS 3274.
- Espesor de tubos de acero de intercambiadores. *British Standards*, BS 3606.
- Materiales según norma ASME sección VIII y ASTM.

10.4.3 Referente a depósitos

- ASME *Boiler and Pressure Vessel Code* (ASME BPV).
- Diseño mecánico, materiales de construcción y pruebas. *British Standards*, BS 5500.
- Materiales según norma ASME sección VIII y ASTM.

10.4.4 Otros

- Diseño mecánico y materiales de tuberías. ASME B31.
- ANSI/ISA 5.1-2009. Instrumentación, símbolos e identificaciones.
- ANSI/API Standard 530/ISO 13704:2001 *Calculation of Heater Thickness in Petroleum Refineries*.
- API Standard 560 *Fired Heaters for General Refinery Service*.
- Materiales y fabricación de válvulas. ASTM A 216 WCB.
- Extremos de las válvulas bridadas. ANSI B 16.5.
- Materiales y fabricación de pernos. ASTM A 193 Gr. B7.
- Materiales y fabricación de tuercas de pernos. ASTM A 194 Gr. 2H.

11.BIBLIOGRAFÍA

[1] ELVERS, B., HAWKINS, S., RAVENSCROFT, M., SCHULZ, G. *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Volumen A 13. 5ª edición, Weinheim (Alemania): VCH, 1989. ISBN 3-527-20113-0

[2] KIRK, R. E. *Encyclopedia of Chemical Technology*, Volumen 13. 4ª edición, EE.UU.: John Wiley & Sons, 1991. ISBN 0-471-52669-X

[3] USC INVESTIGACIÓN – SECCIÓN DE RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN). *Introducción al RMN. El espín nuclear* [sitio web] [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en:

<http://www.usc.es/gl/investigacion/riaidt/rm/rmn/introduccion.html>

[4] SUBRAMANI, V., A. BASILE y T. N. VEZIROGLU, *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Production and Purification*. 1ª edición, Oxford: Elsevier, 2015. ISBN 978-1-78242-383-6

[5] LINDE. *Aplicaciones de hidrógeno* [sitio web]. The Linde Group [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.linde-gas.ec/es/processes/process_chemistry_and_refining/hydrogen_applications/index.html

[6] LINDE. *Aplicaciones de hidrógeno en refinerías* [sitio web]. The Linde Group [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.linde-gas.co/es/processes/petrochemical_processing/hydrogen_applications_refineries/index.html

[7] BOTAS, J. A., SAN MIGUEL, G., DUFOUR, J., CALLES, J. A. *La economía del hidrógeno 2. Aplicaciones convencionales del hidrógeno y pilas de combustible* [pdf en línea]. Grupo de Ingeniería Química y Ambiental, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.aecientificos.es/empresas/aecientificos/documentos/LA_ECONOMIA_HIDROGENO_2.pdf.

[8] BRITISH PETROLEUM. *BP Statistical Review of World Energy (June 2015)* [pdf en línea]. 64ª edición, Reino Unido [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>

[9] BOTAS, J. A., SAN MIGUEL, G., DUFOUR, J., CALLES, J. A. *La economía del hidrógeno. Una visión global sobre la revolución energética del siglo XXI* [pdf en línea]. Grupo

de Ingeniería Química y Ambiental, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: <http://www.aecientificos.es/empresas/aecientificos/documentos/LAECONOMIADELHIDROGENO.pdf>

[10] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Hydrogen and Fuel Cells Program. 2004 Annual Progress Report* [sitio web]. Washington [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: https://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress04.html

[11] COMISIÓN EUROPEA. *Hydrogen energy and fuel cells. A vision of our future* [pdf en línea]. Informe EUR 20719 EN, Directorate-General for Research, Directorate J – Energy, Bruselas, 2003 [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: http://europa.eu/comm/research/energy/pdf/hydrogen-report_en.pdf

[12] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Hydrogen and Fuel Cells Program. 2015 Annual Progress Report* [sitio web]. Washington [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: https://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress15.html

[13] COMISION EUROPEA. *First Interim Evaluation of the Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking* [libro electrónico]. Directorate-General for Research and Innovation, Directorate J – Energy, 2011 [consultado el 26 de abril de 2016]. ISBN 978-92-79-20502-6, DOI 10.2777/65244. Disponible en: http://bookshop.europa.eu/en/first-interim-evaluation-of-the-fuel-cell-and-hydrogen-joint-undertaking-pbKINA24862/downloads/KI-NA-24862-EN-N/KINA24862ENN_002.pdf;pgid=Iq1Ekni0.11SR00OK4MycO9B0000yLOZCSPZ;sid=jX5VqAlbIYJVkV5qcrPLD2t-iq1Tew6li60=?FileName=KINA24862ENN_002.pdf&SKU=KINA24862ENN_PDF&CatalogueNumber=KI-NA-24862-EN-N

[14] FÚNEZ GUERRA, C., ALMANSA RODRÍGUEZ, E., FUENTES FERRERA, D. *El hidrógeno: vector energético del futuro* [pdf en línea]. Ciudad Real [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3395283.pdf>

[15] DUNN, S. Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2002, 27, 235-264. ISSN 0360-3199

[16] ZHOU, L. Progress and problems in hydrogen storage methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2005, 9, 395-408. ISSN 1364-0321

[17] ZÜTTEL, A. Materials for hydrogen storage. *Materials Today*, 2003, 6, 24-33. ISSN 1369-7021

[18] ZÜTTEL, A. Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften*, 2004, 91(4), 157-172. ISSN 1432-1904

[19] ETSII-UPM. *Almacenamiento y transporte del hidrógeno* [sitio web]. Madrid [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.energiasostenible.net/almacenamiento_y_transporte_de_hidrog.htm

[20] ZECOSA. *Informe de mercado: Hidrógeno* [pdf en línea]. DYNA, Industria a Ingeniería. Las Palmas de Gran Canaria [consultado el 26 de abril de 2016]. Disponible en: <http://www.revistadyna.com/noticias-de-ingenieria/informe-de-mercado-hidrogeno-zecsa>

[21] HYWAYS. *The European Hydrogen Energy Roadmap* [pdf en línea]. Comisión Europea [consultado el 30 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.hyways.de/docs/Brochures_and_Flyers/HyWays_Roadmap_FINAL_22FEB2008.pdf

[22] LINDE-ENGINEERING. *Reformado con vapor* [sitio web]. The Linde Group [consultado el 30 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.linde-engineering.cl/es/process_plants/hydrogen_and_synthesis_gas_plants/gas_generation/steam_reforming/index.html

[23] ERTL, G., KNOZINGER, H., WEITKAMP, J., *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, Volumen 4. 1ª edición, Weinheim (Alemania): Wiley-VCH, 1997. ISBN 3-527-29212-8

[24] ELVERS, B., HAWKINS, S., SCHULZ, G. *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Volumen A 17. 5ª edición, Weinheim (Alemania): VCH, 1989. ISBN 3-527-20113-0

[25] ORTS GIL, G. *Procesos relacionados con el CO₂: nuevas perspectivas* [sitio web]. SINC Europa [consultado el 2 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.agenciasinc.es/Opinion/Procesos-relacionados-con-el-CO2-nuevas-perspectivas>

[26] STATOIL. *Sleipner West* [sitio web]. Carbon capture and storage, New energy, Technology and Innovation [consultado el 2 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/Co2CaptureStorage/Pages/SleipnerVest.aspx>

[27] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Energy Department Invests to Drive Down Costs of Carbon Capture, Support Reductions in Greenhouse Gas Pollution* [sitio web]. Washington DC, [consultado el 2 de mayo de 2016]. Disponible en:

<http://www.energy.gov/articles/energy-department-invests-drive-down-costs-carbon-capture-support-reductions-greenhouse-gas>

[28] AIR LIQUIDE. *Enciclopedia de los gases* [sitio web]. [Consultado el 8 de mayo de 2016]. Disponible en:

<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?GasID=26&LanguageID=9&CountryID=19>

[29] KIRK, R. E. *Encyclopedia of Chemical Technology*, Volumen 5. 4ª edición, EE.UU.: John Wiley & Sons, 1991. ISBN 0-471-52669-X

[30] PERSISTENCE MARKET RESEARCH. *Global Market Study on Hydrogen* [pdf en línea]. Nueva York [consultado el 3 de mayo de 2016]. Disponible en: https://biotechspain.com/file_download.cfm?ftid=1&fid=83

[31] DIAS SILVA, J., MORAES de ABREU, C. A. Modelling and simulation in conventional fixed-bed and fixed-bed membrane reactors for the steam reforming of methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, volumen 30, 1-15. ISSN 0360-3199

[32] TOMINAGA, H., TAMAKI M., *Chemical Reactor and Reactor Design*, 1ª edición, Londres (Gran Bretaña): Wiley and Maruzen , 1998. ISBN 0-471-97792-6

[33] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). *Wind to Hydrogen Project Animation* [sitio web]. Washington DC: U.S. Department of Energy [consultado el 8 de mayo de 2016]. Disponible en: http://www.nrel.gov/hydrogen/proj_wind_hydrogen_animation.html

[34] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Hydrogen production: Thermochemical Water splitting* [sitio web]. Washington DC, [consultado el 8 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>

[35] LEE, S., *Methane and its derivatives*, 1ª edición, EE. UU.: Marcel Dekker, 1997. ISBN 0-8247-9754-X

[36] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). *Survey and Down-Selection of Acid Gas Removal Systems for the Thermochemical Conversion with a Detailed Analysis of an MDEA System* [pdf en línea]. Nexant Inc. San Francisco, California [consultado el 8 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/50482.pdf>

[37] VAIDYA, P. D., MAHAJANI, V. V. Quickly design CO₂ – amine absorber. *Indian Journal of Chemical Technology*, 2006, 13, 47-52. ISSN 0971-457X

[38] SINNOTT, R., TOWLER, G., *Diseño en ingeniería química*. 5ª edición, Barcelona: Reverté, 2009. ISBN 978-84-291-7199-0

[39] GÓMEZ-SENENT MARTÍNEZ, E., GÓMEZ-SENENT MARTÍNEZ, D., ARAGONÉS BELTRÁN, P., SÁNCHEZ ROMERO, M. A., LÓPEZ GÓMEZ-SENENT, D. *Cuadernos de ingeniería de proyectos I Diseño básico (anteproyecto) de plantas industriales*, 1ª edición (Valencia): Universidad Politécnica de Valencia, 1997. ISBN 84-7721-516-2

[40] REGANOSA. *Terminal de GNL Características* [sitio web] [consultado el 5 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.reganosa.com/es/caracteristicas>

[41] XESTIÓN DO SOLO DE GALICIA, XESTUR. *Plano interactivo do parque: P.E. 223-A Sionlla* [sitio web] [consultado el 5 de mayo de 2016]. Disponible en: http://www.xesturgalicia.com/index.php?seccion=solo_empresarial&opcion=fichape&id=223

[42] INGESTIN REAL ESTATE. *Parque empresarial de A Sionlla. Santiago de Compostela* [sitio web] [consultado el 5 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.ingestin.com/parque-empresarial-de-sionlla-santiago-de-compostela/>

[43] NOTICIAS ESPAÑA – ECONOMÍA, MAPAS, VIAJES, ETC. *Mapa Geográfico de España* [sitio web] [consultado el 6 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.noticiasespana.es/2013/03/mapa-geografico-de-espana.html>

[44] ZONU. *Mapa de carreteras de la Provincia de La Coruña* [sitio web] [consultado el 6 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.zonu.com/detail/2009-09-17-6059/Mapa-de-carreteras-de-la-Provincia-de-La-Corua.html>

[45] PERRY, R. H., GREEN, W., MALONEY, J. O. *Perry manual del ingeniero químico*. 7ª edición (3ª en español), Madrid: McGraw-Hill, 2001. ISBN 84-481-3343-9

[46] DRESSER-RAND. *Centrifugal Compressor Performance Use for estimating the D-R DATUM compressor for your process* [sitio web], [consultado del 20 al 23 de abril de 2016]. Disponible en: <http://cirs.dresser-rand.com/TurboCalc/GasAnalysis.asp>

[47] PENTAIR. *Pentair Electronic Catalog* [sitio web] [consultado el 20 de marzo de 2016]. Disponible en: http://sta-rite.intelliquip.com/IEQ_HydSel/HydSel_JSP/intelliquip/main.jsp?selectedURL=/start

[48] FLOWSERVE. *LPN ISO 13709/API 610 (BB1) Between Bearings, Single Case, Axially Split, Double Suction, Single Stage Pump* [sitio web] [consultado el 20 de marzo de 2016]. Disponible en: http://www.flowserve.com/es_ES/Products/Pumps/Between-

[Bearings/Single-Case-Axially-Split/LPN-ISO-13709-API-610-%28BB1%29-Between-Bearings%2C-Single-Case%2C-Axially-Split%2C-Double-Suction%2C-Single-Stage-Pump%2Cen_US](#)

[49] PETERS, M. S., TIMMERHAUS, K. D., WEST, R. E. *Plant design and economics for chemical engineers*. 5ª edición, Nueva York (EE. UU.): McGraw-Hill, 2004. ISBN 9780071240444

[50] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, *Fired Heaters for General Refinery Service*, 3ª edición, Washington (EE. UU.): American Petroleum Institute, 2001. API Standard 560

[51] JONSON MATTHEY PROCESS TECHNOLOGIES. *Steam reforming in refineries* [sitio web] [consultado el 29 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://www.jmprotech.com/steam-reforming-catalysts-refineries-johnson-matthey>

[52] XU, J., FROMENT, G. F. Methane Steam Reforming, Methanation and Water-Gas Shift: I. Intrinsic Kinetics. *AIChE Journal*, 1989, volumen 35, nº 1, 88-96. ISSN 1547-5905

[53] AL-MEGEREN, H., XIAO, I. Natural Gas Dual Reforming Catalyst and Process. En: AL-MEGEREN, Hamid. *Advances in Natural Gas Technology* [en línea]: Intech, 2012, 388-406. ISBN: 978-953-51-0507-7 [consultado el 26 abril de 2016]. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-natural-gas-technology>

[54] OLIVEIRA, E. L. G., GRANDE, C. A., RODRIGES, A. E. Steam Methane Reforming in a Ni/Al₂O₃ Catalyst: Kinetics and Diffusional Limitations in Extrudates. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2009, volumen 87, 945-956. ISSN 1939-019

[55] PERRY, R. H., GREEN, W., MALONEY, J. O. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 5ª edición, EE. UU.: McGraw-Hill, 1984. ISBN 0-07-049479-7

[56] TWIGG, M. V., *Catalyst handbook*. 2ª edición, Londres: Wolfe Publishing, 1989. ISBN 0-7234-0857-2

[57] TRAMBOUZE, P. *Petroleum refining*, Tomo 4: Materials and equipment. 1ª edición, París (Francia): Editions TECHNIP, 2000. ISBN 2-7108-0761-0

[58] AB UQIR FERTILIZERS TRAINING CENTER. *Process courses* [sitio web]. AburQir Fertilizers CO. [consultado el 27 de abril de 2016]. Disponible en: <http://www.abuqir.com/Training/process.html>

[59] LINDE. *Hydrogen* [pdf en línea]. The Linde Group [consultado el 25 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.linde-engineering.com/internet.global.lindeengineering.global/en/images/H2_1_1_e_12_150dpi19_42_58.pdf

[60] EBRAHIMI, H., ZAMANIYAN, A., HOSSEINI, R., FORSAT, K. Analysis of reformer furnace tubes for hydrogen production using radiative zonal model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, volumen 39, 13164-13173. ISSN 0360-3199

[61] COMTECQUEST. *Design Practice* [sitio web] [consultado el 25 de abril de 2016]. Disponible en: <http://comtecquest.com/Practice/practice13.html>

[62] KUMAR, A., BALDEA, M., EDGAR, T. F., EZEKOYE, O. A. Smart Manufacturing Approach for Efficient Operation of Industrial Steam-Methane Reformers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, volumen 54, 4360-4370. ISSN 0888-5885

[63] OLIVIERI, A., VEGLIO, F. Process simulation of natural gas steam reforming: Fuel distribution optimization in the furnace. *Fuel processing technology*, 2008, volumen 89, 622-632. ISSN 0378-3820

[64] MULLINGER, P., JENKINS, B., *Industrial and process furnaces*, Amsterdam: Elsevier, 2008. ISBN 9780750686921

[65] PERRY, R. H., GREEN, W., MALONEY, J. O. *Manual del ingeniero químico*, Volumen 3. 7ª edición (4ª en español), Madrid: McGraw-Hill, 2001. ISBN 84-481-3344-7

[66] LINDE. *Hydrogen Recovery by Pressure Swing Adsorption* [pdf en línea]. The Linde Group [consultado el 29 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.linde-engineering.com/internet.global.lindeengineering.global/en/images/HA_H_1_1_e_12_150dpi19_6130.pdf

[67] THE MCILVAINE COMPANY. *Pressure Swing Adsorption Plants* [sitio web] [consultado el 30 de abril de 2016]. Disponible en: http://www.mcilvainecompany.com/Decision_Tree/subscriber/Tree/DescriptionTextLinks/Pressure%20Swing%20Adsorption%20of%20Hydrogen.htm

[68] LOPES, F., GRANDE, C. A., RODRIGUES, A. E. Activated carbón for hydrogen purification by pressure swing adsorption: Multicomponent breakthrough curves and PSA performance. *Chemical Engineering Science*, 2011, volumen 66, 303-317. ISSN 0009-2509

[69] UNION CARBIDE CO. *Pressure swing adsorption process and system*. Inventor: Andrija FUDERER. United States patent application number: 315,418. Publicada el 26 de abril de 1983.

[70] SOTO CAMPOS, A. M., *Introducción al control de procesos químicos*, 1ª edición, España: USC, 2013. ISBN 978-84-9887-960-5

[71] LIPTÁK, B. G., *Instrument Engineer's handbook*, Volume II: Process Control and Optimization, 4ª edición, EE. UU.: Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-8493-1081-4

[72] FERNANDEZ de la CALLE, I., *SEGURIDAD FUNCIONAL EN INSTALACIONES DE PROCESO* *Sistemas Instrumentados de Seguridad y Análisis SIL*, 1ª edición, España: Ediciones Díaz Santos, 2012. ISBN 978-84-9969-210-4

[73] SVRCEK, W. Y., MAHONEY, D. P., YOUNG, B. R., *A Real-Time Approach to Process Control*, 2ª edición, Inglaterra: Wiley, 2006. ISBN 978-0-470-02533-8

[74] MÉNCEZ F., CORRALES, J., Manual de control de procesos (II). *Ingeniería química*, 2008, volumen 462, 294-303. ISSN 0210-2064

[75] MÉNCEZ F., CORRALES, J., Manual de control de procesos (III). *Ingeniería química*, 2008, volumen 465, 93-99. ISSN 0210-2064

[76] OFFICE OF RESPONSE AND RESTORATION. *Chemical Reactivity Worksheet* [sitio web] [consultado el 23 de junio de 2016]. Disponible en: <http://response.restoration.noaa.gov/reactivityworksheet>

[77] SEGURIDAD INDUSTRIAL. *Entiendes el Rombo de NFPA* [sitio web] [consultado el 23 de junio de 2016]. Disponible en: <https://seguridadindustrialgt.wordpress.com/2012/08/02/entiendes-el-rombo-de-nfpa/>

[78] INDUSTRIAL RISK INSURERS (IRI). *Oil and Chemical Plant Layout and Spacing* [pdf en línea]. IRInformation, 1996 [consultado el 24 de junio de 2016]. Disponible en: <http://docslide.us/getdownload/document/?id=3IrE10aKK2BcmVYqIWfSKGo3EOyRK9451Hjnb3oLkG2rR22b3K7N4uxvx6XkLpuQfQEM9LeJmTnljloigJX4lg%3D%3D>

[79] GAP GUIDELINES. *Oil and Chemical Plant Layout and Spacing* [pdf en línea]. A Publication of Global Asset Services, 2001 [consultado el 24 de junio de 2016]. Disponible en: <http://docslide.us/documents/ge-gap-252-2001-oil-and-chemical-plant-layout-and-spacing-high-quality.html>

[80] ESTALELLA MOREY, V., TURNO SIERRA, E., TURUGUET MAYOL, D.
Índice de incendio y explosión. Guía para la clasificación de riesgos, traducción de la 5ª edición en inglés, Madrid: Mapfre, Centro de Documentación, 1983. ISBN 84-500-9062-8

Anexo I.

Balances de materia

Planta de Producción de Hidrógeno por

Reformado de Gas Natural

INDICE ANEXO I

1. INTRODUCCIÓN	3
2. PRETRATAMIENTO DE LA ALIMENTACIÓN (SECCIÓN 100).....	3
2.1 Balance de materia al absorbedor C-101 y al desorbedor C-102	3
2.1.1 Cálculo de las corrientes de amina rica (corrientes 2, 3 y 4)	4
2.1.2 Cálculo del caudal de agua requerido y pérdidas.....	5
2.1.3 Cálculo de las corrientes de amina pobre (corrientes 6, 7, 8 y 9)	5
2.1.4 Determinación de las corrientes 10 y 11	5
2.1.5 Tablas de resultados.....	6
3. SECCIÓN DE REACCIÓN QUÍMICA (SECCIÓN 200).....	9
3.1 Unión de la recirculación con la corriente desulfurada: Corrientes 11, 12, 13 y 40 ...	9
3.2 Salida del compresor K-201 y mezcla con la alimentación de vapor fresco: corrientes 14, 15 y 16.....	11
3.3 Balance de materia al reformador R-201: Corrientes 17 y 18.....	12
3.4 Balance de materia al HTS (R-202): Corrientes 19 y 20	13
3.5 Balance de materia al LTS (R-203): Corrientes 21 y 22	15
4. SEPARACIÓN Y PURIFICACIÓN (SECCIÓN 300)	16
4.1 Balance de materia al separador de condensados S-301	16
4.2 Balance de materia al absorbedor C-301 y al desorbedor C-302	19
4.3 Balance de materia a la unidad de PSA: Corrientes 37, 38 y 41	25
4.4 Balance de materia a las corrientes 38, 39 y 40	26
5. BIBLIOGRAFÍA	28

1. INTRODUCCIÓN

A continuación se planteará el balance de materia del proceso, determinando paso a paso los caudales y composiciones de las corrientes del mismo. Para ello se aplicará de forma genérica la ecuación general del balance de materia:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} = \text{Acumulación}$$

2. PRETRATAMIENTO DE LA ALIMENTACIÓN (SECCIÓN 100)

2.1 Balance de materia al absorbedor C-101 y al desorbedor C-102

De forma general, se conoce como amina rica a aquella disolución de MEA en agua con alto contenido de gases ácidos disueltos, mientras que la amina pobre será aquella disolución de MEA en agua con un bajo contenido en gases ácidos.

La corriente 1 se introduce en el absorbedor C-101, en donde se absorberá el máximo contenido de azufre posible, junto con algo de CO₂. La salida desulfurada constituye la corriente 11. Además, en el absorbedor C-101 entra la amina pobre a través de la corriente 9 y sale la amina rica a través de la corriente 2.

En cuanto a las corrientes de entrada y salida del desorbedor C-102, tras el intercambio de calor producido en el intercambiador E-101, la amina rica entra en el desorbedor a través de la corriente 4, y la amina pobre sale por la corriente 6. Las corrientes 2, 3, y 4 tienen las mismas composiciones y caudales, y lo mismo sucede con las corrientes 6, 7, 8 y 9. Los gases ácidos que se separan en el desorbedor salen por la corriente 10, junto con algo de vapor de agua. Esta cantidad de vapor que se pierde por 10 se incorpora al sistema por la corriente 5.

La relación entre las corrientes y los equipos se muestra gráficamente en la Figura I.1.

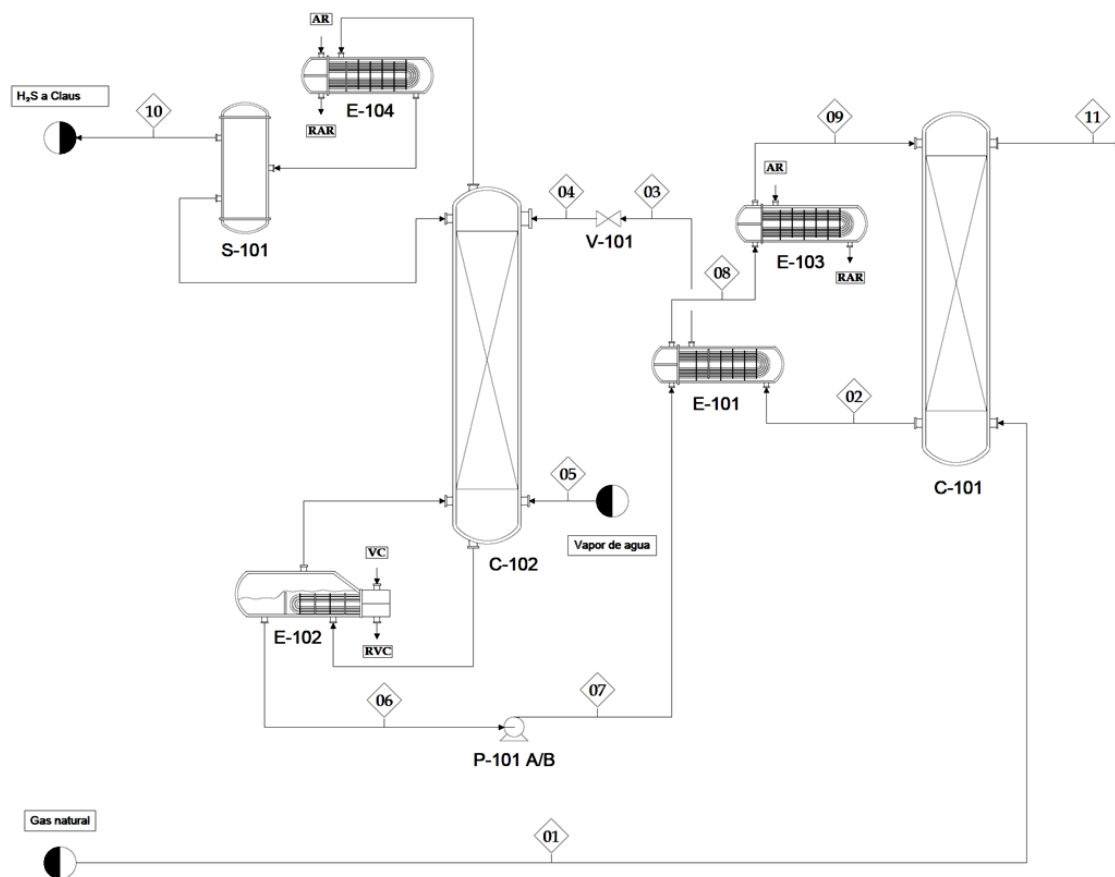


Figura I.1. Corrientes de entrada y salida a las columnas de absorción (C-101) y desorción (C-102)

A continuación se describirá el proceso para la determinación de los caudales y composiciones de dichas corrientes.

2.1.1 Cálculo de las corrientes de amina rica (corrientes 2, 3 y 4)

La cantidad de amina necesaria para la absorción del H_2S , fundamentalmente, junto con algo de dióxido de carbono se determina de acuerdo a los datos bibliográficos. [1]

De este modo se conoce que se absorben 0,546 moles de H_2S por mol de MEA. Por lo tanto, a partir de aquí se pueden calcular los moles de MEA que contendrán las corrientes 2, 3 y 4, para que se absorba la práctica totalidad del H_2S que se introduce en el sistema por medio de la corriente 1.

Esta amina, aunque absorbe mayoritariamente el H_2S , como se ha dicho, también absorbe algo de CO_2 . Los moles de CO_2 absorbidos se obtienen sabiendo que se absorben 0,267 moles de CO_2 por mol de MEA en la amina rica.

2.1.2 Cálculo del caudal de agua requerido y pérdidas

Una vez conocido el caudal de MEA necesario para la absorción del H_2S , sabiendo que se emplea una disolución acuosa del 15% en peso, se puede determinar el caudal de agua necesario que acompañará a la MEA. Esta disolución de MEA en agua circula en un circuito cerrado, regenerándose constantemente en el desorbedor C-102, por lo que teóricamente los caudales de amina y agua deberían de ser constantes en todas las corrientes de este circuito, no obstante se producen pérdidas de vapor que salen por la corriente 10. El caudal de vapor que se pierde se introduce en el desorbedor C-102 por la corriente 5. Del mismo modo, también tienen lugar pérdidas de MEA a medida que se suceden los ciclos de absorción-regeneración, produciéndose una pérdida de eficacia en el sistema. Sería por lo tanto necesario introducir periódicamente una determinada cantidad de amina fresca en el sistema.

2.1.3 Cálculo de las corrientes de amina pobre (corrientes 6, 7, 8 y 9)

Por otra parte, las composiciones de las corrientes de amina pobre se determinan nuevamente a partir de los datos bibliográficos. De este modo, según los estudios realizados por Dow Chemical en *Energy and performance optimization for H_2S removal from sour gases in refinery units* [1], se conoce que las corrientes de amina pobre contienen $8,89 \cdot 10^{-3}$ moles de CO_2 por mol de MEA y $1,74 \cdot 10^{-4}$ moles de H_2S por mol de MEA.

2.1.4 Determinación de las corrientes 10 y 11

Los gases desorbidos en la columna C-102 salen por cabezas con un contenido importante de vapor de agua (el 25% molar de la corriente). La mayor parte del mismo se condensa y se recircula a la columna, pero una parte de este vapor sale por la corriente 10, junto con los gases ácidos. [2]

Por otro lado, la composición y el caudal de la corriente 11 se pueden determinar al plantear el balance de materia al absorbedor, ya que se conocen los caudales y composiciones de las corrientes 1, 2 y 9, de modo que:

$$M_1 + M_9 = M_2 + M_{11}$$

2.1.5 Tablas de resultados

Las composiciones y caudales de las corrientes de entrada y salida a las columnas C-101 y C-102 se recogen en las Tablas I.1 y I.2. De este modo se puede comprobar fácilmente como se cumplen balances como:

- Balance de materia global al sistema absorción-desorción:

$$M_1 + M_5 = M_{10} + M_{11}$$

- Balance de materia al absorbedor:

$$M_1 + M_9 = M_2 + M_{11}$$

- Balance de materia al desorbedor:

$$M_4 + M_5 = M_6 + M_{10}$$

Donde:

M: es caudal másico (kg/h).

En cuanto a las corrientes intermedias que circulan entre ambas columnas, como se ha dicho anteriormente, las corrientes 2, 3 y 4 poseen las mismas composiciones y caudales, y lo mismo sucede entre las corrientes 6, 7, 8 y 9.

Tabla I.1. Corrientes de entrada y salida del absorbedor C-101

	1			2			9			11		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N ₂	144,210	5,150	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	144,210	5,150	1,001
CO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CO ₂	118,324	2,689	0,500	13,339	0,303	1,111	0,444	0,010	0,038	105,428	2,396	0,466
CH ₄	7820,068	488,754	94,900	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7820,068	488,754	95,033
C ₂ +	539,947	17,998	3,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	539,947	17,998	3,5000
H ₂ O	0,000	0,000	0,000	454,183	25,232	92,456	454,183	25,232	95,656	0,000	0,000	0,000
MEA	0,000	0,000	0,000	69,354	1,135	4,161	69,354	1,135	4,305	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	21,079	0,620	0,100	21,085	0,620	2,272	0,007	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
TOTAL	8643,627	515,212	100,000	557,962	27,291	100,000	523,988	26,378	100,000	8609,653	514,299	100,000

Tabla I.2. Corrientes de entrada y salida del desorbedor C-102

	4			5			6			10		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CO ₂	13,339	0,303	1,111	0,000	0,000	0,000	0,444	0,010	0,038	12,895	0,293	32,067
CH ₄	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
C ₂ +	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	454,183	25,232	92,456	0,016	0,001	100,000	454,183	25,232	95,656	0,016	0,001	0,100
MEA	69,354	1,135	4,161	0,000	0,000	0,000	69,354	1,135	4,305	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	21,085	0,620	2,272	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,001	21,079	0,620	67,833
TOTAL	557,962	27,291	100,00	0,016	0,001	100,000	523,988	26,378	100,000	33,990	0,914	100,000

3. SECCIÓN DE REACCIÓN QUÍMICA (SECCIÓN 200)

3.1 Unión de la recirculación con la corriente desulfurada: Corrientes 11, 12, 13 y 40

La corriente 13 es el resultado de la unión de las corrientes 11 y 12, la salida del absorbedor C-101 y la recirculación, respectivamente. La corriente 12 tiene la misma composición y caudal que la corriente de la recirculación (corriente 40), que circula a través del equipo para alcanzar las condiciones de presión necesarias, sin un aumento excesivo de la temperatura (Figura I.2).

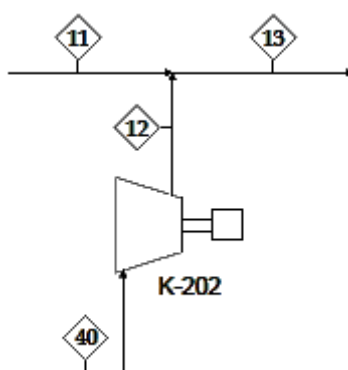


Figura I.2. Esquema de la relación entre las corrientes 11, 12, 13 y 40

Los caudales y composiciones de las corrientes se muestran en la Tablas I.3.

Tabla I.3. Composiciones y caudales de las corrientes 11, 12, 13 y 40

	11			12			13			40		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	0,000	0,000	0,000	51,521	25,761	63,062	51,521	51,521	51,521	51,521	25,761	63,062
N ₂	144,210	5,150	1,001	15,274	0,545	1,335	159,484	159,484	159,484	15,274	0,545	1,335
CO	0,000	0,000	0,000	39,650	1,416	3,467	39,650	39,650	39,650	39,650	1,416	3,467
CO ₂	105,428	2,396	0,466	84,061	1,910	4,677	189,490	189,490	189,490	84,061	1,910	4,677
CH ₄	7820,068	488,754	95,033	133,312	8,332	20,397	7953,380	7953,380	7953,380	133,312	8,332	20,397
C ₂ +	539,947	17,998	3,500	0,000	0,000	0,000	539,947	539,947	539,947	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	0,000	0,000	0,000	51,925	2,885	7,062	51,925	51,925	51,925	51,925	2,885	7,062
MEA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	8609,653	514,299	100,000	375,743	40,849	100,000	8985,396	8985,396	8985,396	375,743	40,849	100,000

3.2 Salida del compresor K-201 y mezcla con la alimentación de vapor fresco: corrientes 14, 15 y 16

En la Tabla I.4 se recogen los caudales y las composiciones de la salida del compresor K-201 y de su mezcla con la alimentación de vapor de agua fresco (Figura I.3). La corriente 14 es el resultado de aumentar la presión de la corriente 13, por lo que sus caudales y composiciones son los mismos.

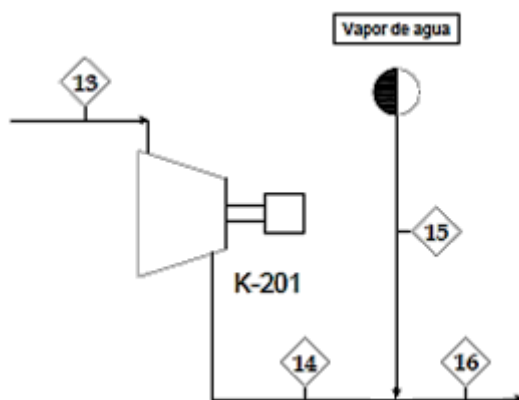


Figura I.3. Esquema de la relación entre las corrientes 13, 14, 15 y 16

Tabla I.4. Composiciones y caudales de las corrientes 14, 15 y 16

	14			15			16		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	51,521	25,761	4,640	0,000	0,000	0,000	51,521	25,761	1,186
N ₂	159,484	5,696	1,026	0,000	0,000	0,000	159,484	5,696	0,262
CO	39,650	1,416	0,255	0,000	0,000	0,000	39,650	1,416	0,065
CO ₂	189,490	4,307	0,776	0,000	0,000	0,000	189,490	4,307	0,198
CH ₄	7953,380	497,086	89,541	0,000	0,000	0,000	7953,380	497,086	22,891
C ₂ +	539,947	17,998	3,242	0,000	0,000	0,000	539,947	17,998	0,829
H ₂ O	51,925	2,885	0,520	29095,488	1616,416	100,000	29147,413	1619,301	74,568
MEA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	8985,397	555,148	100,000	29095,488	1616,416	100,000	38080,885	2171,564	100,000

3.3 Balance de materia al reformador R-201: Corrientes 17 y 18

La corriente 16 se calienta en la sección de convección del reformador (E-201), obteniéndose la corriente 17, que se alimenta al reactor (R-201), saliendo del mismo la corriente 18 (Figura I.4).

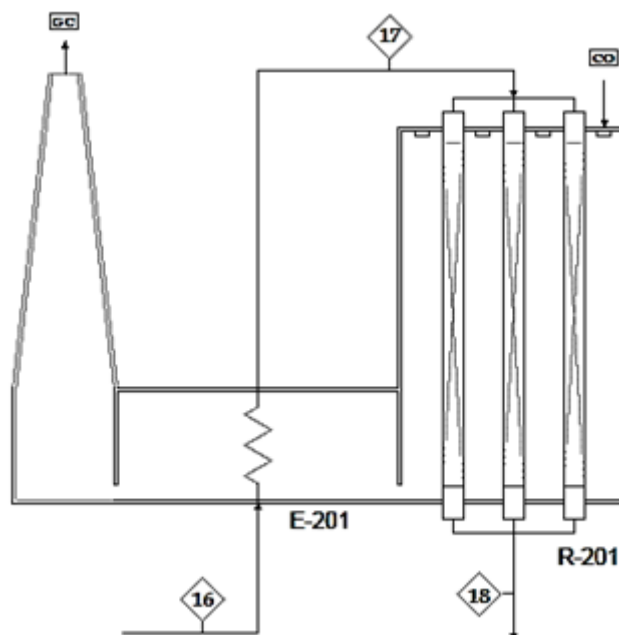


Figura I.4. Esquema de la relación entre las corrientes 16, 17 y 18

La composición de la corriente de salida del reformador se calcula conforme a lo especificado en el Anexo I: Cálculos justificativos, en el apartado correspondiente al diseño del reformador. En concreto, las reacciones que tienen lugar son de equilibrio, por lo tanto el diseño del reformador se fundamenta en determinar cuál es la máxima conversión que puede alcanzar a una temperatura ligeramente menor a la de salida del reactor, debido a factores cinéticos.

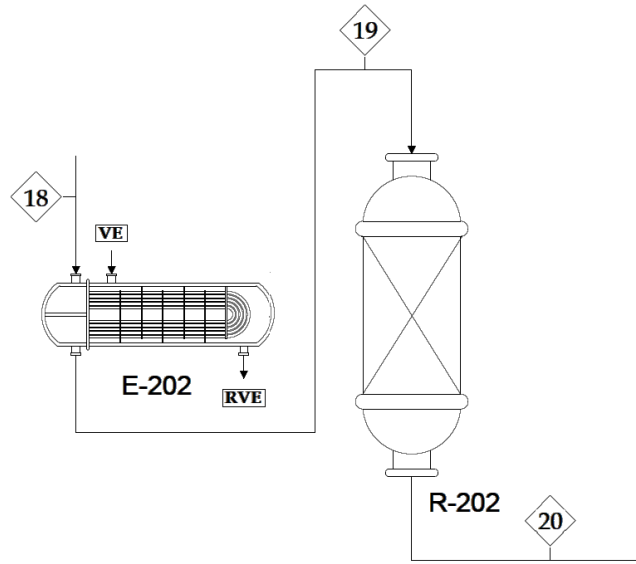
Los caudales y composiciones de las corrientes 16, 17 y 18 se muestran en la Tabla I.5.

Tabla I.5. Composiciones y caudales de las corrientes 16, 17 y 18

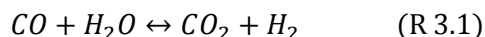
	16			17			18		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	51,521	25,761	1,186	51,521	25,761	1,186	3154,448	1577,224	50,622
N ₂	159,484	5,696	0,262	159,484	5,696	0,262	159,484	5,696	0,183
CO	39,650	1,416	0,065	39,650	1,416	0,065	8964,279	320,153	10,276
CO ₂	189,490	4,307	0,198	189,490	4,307	0,198	6935,256	157,619	5,059
CH ₄	7953,380	497,086	22,891	7953,380	497,086	22,891	976,529	61,033	1,959
C ₂₊	539,947	17,998	0,829	539,947	17,998	0,829	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	29147,413	1619,301	74,568	29147,413	1619,301	74,568	17890,889	993,938	31,901
MEA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	38080,885	2171,564	100,000	38080,885	2171,564	100,000	38080,885	315,664	100,000

3.4 Balance de materia al HTS (R-202): Corrientes 19 y 20

La corriente 18 se enfría en el intercambiador E-202, obteniéndose la corriente 19 (con la misma composición y caudal), que se alimenta al reactor *shift* de alta temperatura (HTS) R-202, saliendo del mismo la corriente 20 (Figura I.5).

**Figura I.5.** Esquema de la relación entre las corrientes 18, 19 y 20

La reacción que tiene lugar en este reactor se conoce como *water gas shift reaction* (WGS):



Se trata de una reacción exotérmica reversible, cuya constante de equilibrio es inversamente proporcional a la temperatura. En consecuencia, temperaturas bajas favorecen la conversión, pero dificultan la cinética. Para conseguir velocidades de reacción suficientemente altas y un grado de conversión bueno se opta por trabajar con dos reactores a temperaturas diferentes. El primero a temperaturas altas, que favorezcan la cinética (HTS) y el segundo a otras más bajas, que posibilitan un grado de conversión más elevado (LTS). [3]

La constante de equilibrio para esta reacción se puede expresar como:

$$K_p = \frac{p_{H_2} \cdot p_{CO_2}}{p_{CO} \cdot p_{H_2O}} \quad (3.1)$$

Según la bibliografía, el reactor HTS trabaja con una temperatura de salida de 450 °C de forma adiabática y con un grado de conversión de 0,64. [4]

Los caudales y las composiciones de las corrientes 18, 19 y 20 se recogen en la Tabla I.6.

Tabla I.6. Composiciones y caudales de las corrientes 18, 19 y 20

	18			19			20		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	3154,448	1577,224	50,622	3154,448	1577,224	50,622	3564,244	1782,122	57,199
N ₂	159,484	5,696	0,183	159,484	5,696	0,183	159,484	5,696	0,183
CO	8964,279	320,153	10,276	8964,279	320,153	10,276	3227,140	115,255	3,699
CO ₂	6935,256	157,619	5,059	6935,256	157,619	5,059	15950,760	362,517	11,635
CH ₄	976,529	61,033	1,959	976,529	61,033	1,959	976,529	61,033	1,959
C ₂ +	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	17890,889	993,938	31,901	17890,889	993,938	31,901	14202,728	789,040	25,325
MEA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	38080,885	315,664	100,000	38080,885	315,664	100,000	38080,885	315,664	100,000

3.5 Balance de materia al LTS (R-203): Corrientes 21 y 22

La corriente 20 se enfría en el intercambiador E-203, obteniéndose la corriente 21 (con la misma composición y caudal), que se alimenta al reactor *shift* de baja temperatura (LTS) R-203, saliendo del mismo la corriente 22 (Figura I.6).

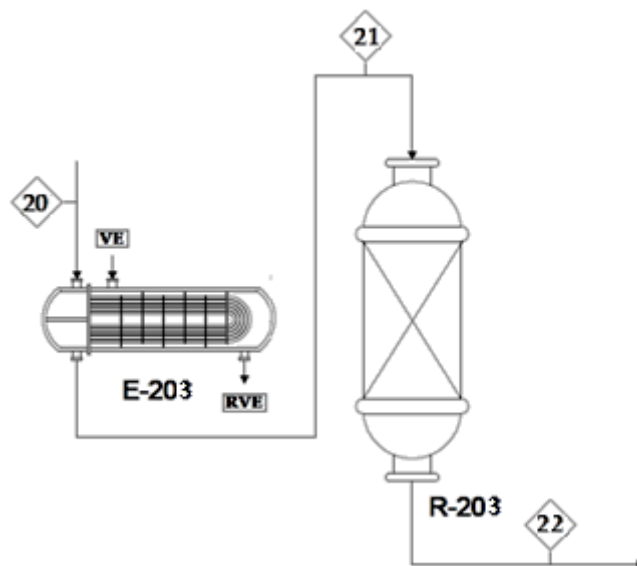


Figura I.6. Esquema de la relación entre las corrientes 20, 21 y 22

El diseño del reactor LTS es similar al anterior, salvo que la temperatura de salida es mucho menor para permitir alcanzar el grado de conversión requerido. Según la bibliografía, la temperatura de salida es de 220 °C y el valor alcanzado de la conversión es de 0,91. [4]

Los caudales y las composiciones de las corrientes 20, 21 y 22 se recogen en la Tabla I.7.

Tabla I.7. Composiciones y caudales de las corrientes 19, 20 y 21

	20			21			22		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	3564,244	1782,122	57,199	3564,244	1782,122	57,199	3774,008	1887,004	60,565
N ₂	159,484	5,696	0,183	159,484	5,696	0,183	159,484	5,696	0,183
CO	3227,140	115,255	3,699	3227,140	115,255	3,699	290,443	10,373	0,333
CO ₂	15950,760	362,517	11,635	15950,760	362,517	11,635	20565,571	467,399	15,002
CH ₄	976,529	61,033	1,959	976,529	61,033	1,959	976,529	61,033	1,959
C ₂ +	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	14202,728	789,040	25,325	14202,728	789,040	25,325	12314,850	684,158	21,959
MEA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	38080,885	315,664	100,000	38080,885	315,664	100,000	38080,885	315,664	100,000

4. SEPARACIÓN Y PURIFICACIÓN (SECCIÓN 300)

4.1 Balance de materia al separador de condensados S-301

La corriente 22 se enfría en el intercambiador E-301, dando lugar a la corriente 23, que se introduce en el separador S-301 con la misma composición y caudal que 22. Los condensados saldrán por la corriente 24, y el resto de los componentes continuarán por la corriente 25 a la siguiente unidad. Esta corriente se comprime en el compresor K-301 y se enfría en el intercambiador E-302, dando lugar a las corrientes 26 y 27, con la misma composición y caudales que 25. Finalmente, la corriente 27 es enviada al absorbedor C-301. Esta relación de corrientes se visualiza gráficamente mediante la Figura I.7.

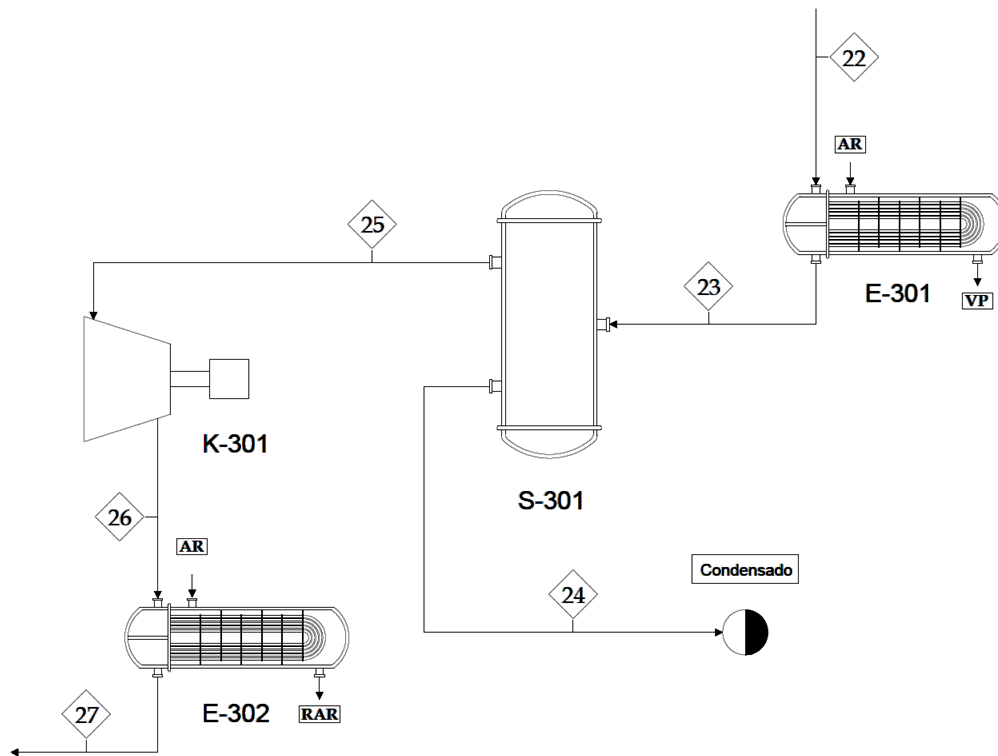


Figura I.7. Esquema de la relación entre las corrientes 22, 23, 24, 25, 26 y 27

El caudal de agua condensada y el CO_2 disuelto en ella que abandona el sistema se determinan haciendo uso del simulador de procesos ASPEN HYSYS. El resto de componentes no se absorben sensiblemente.

Las composiciones y los caudales de las corrientes 23, 24, 25 y 27 se recogen en la Tabla I.8.

Tabla I.8. Composiciones y caudales de las corrientes 23, 24, 25 y 27

	23			24			25			27		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	3774,008	1887,004	60,565	0,000	0,000	0,000	3774,008	1887,004	76,970	3774,008	1887,004	76,970
N ₂	159,484	5,696	0,183	0,000	0,000	0,000	159,484	5,696	0,232	159,484	5,696	0,232
CO	290,443	10,373	0,333	0,000	0,000	0,000	290,443	10,373	0,423	290,443	10,373	0,423
CO ₂	20565,571	467,399	15,002	45,580	1,036	0,156	20519,991	466,363	19,023	20519,991	466,363	19,023
CH ₄	976,529	61,033	1,959	0,000	0,000	0,000	976,529	61,033	2,490	976,529	61,033	2,490
C ₂ +	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	12314,850	684,158	21,959	11934,497	663,028	99,844	380,354	21,131	0,862	380,354	21,131	0,862
MEA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	38080,885	315,664	100,000	11980,076	315,664	100,000	26100,808	2451,600	100,000	26100,808	2451,600	100,000

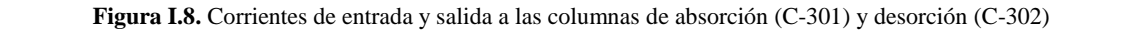
4.2 Balance de materia al absorbedor C-301 y al desorbedor C-302

La corriente 27 se introduce en el absorbedor con reacción química C-301, en dónde se absorberá la mayor parte del CO_2 , de forma que, según se especifica en el diseño del absorbedor, en la Parte B del Anexo III: Cálculos justificativos, la corriente 37 contendrá sólo un 0,7% de CO_2 .

La amina rica sale del absorbedor C-301 por la corriente 28, se calienta en el E-303 A/B y se le reduce la presión, obteniéndose las corrientes 29 y 30, la cual finalmente se alimenta al desorbedor C-302. De este modo, las composiciones y caudales de las corrientes 28, 29 y 30 son iguales.

La amina pobre sale del desorbedor C-302 por la corriente 31, se le aumenta la presión con la bomba P-301 A/B y se enfría en los intercambiadores E-303 A/B y E-304, obteniéndose las corrientes 32, 33 y 34. Esta última corriente se alimenta al absorbedor C-301. Por lo tanto, las composiciones y caudales de las corrientes 31, 32, 33 y 34 son iguales.

El CO_2 que se separa en el desorbedor sale por la corriente 35 con algo de vapor de agua. Este vapor de agua que se pierde se compensa con el que se suministra mediante la corriente 36. Del mismo modo en el que se producen pérdidas de vapor de agua, al igual que en el caso del sistema absorción-desorción de las columnas C-101 y C-102, en este caso también existen pérdidas de amina a medida que se suceden los ciclos de absorción-regeneración, produciéndose una pérdida de eficacia en el proceso de separación. Es por lo tanto necesario introducir cada cierto tiempo una determinada cantidad de amina fresca en el sistema. Dado que no se realiza el diseño riguroso del desorbedor C-302, no se determinarán estas pérdidas, por lo que no se contemplan en el balance de materia.



En cuanto al desorbedor C-302, la corriente gaseosa que sale por cabezas posee un importante contenido en vapor de agua (el 25% molar), el cual se condensa, se separa de la fase gaseosa y se recircula a la columna. Finalmente el CO₂ que se separa, un 90% del que entra en el desorbedor, sale por la corriente 35 con una pureza del 99,99%. [2, 5]

- Balance de materia global al sistema absorción-desorción:

Anexo I: Balances de materia Página 20 de 28

- Balance de materia al absorbedor:

$$M_{27} + M_{34} = M_{28} + M_{37}$$

- Balance de materia al desorbedor:

$$M_{30} + M_{36} = M_{31} + M_{35}$$

Donde:

M: es caudal másico (kg/h).

Tabla I.9. Composiciones y caudales de las corrientes 27, 28, 29 y 30

	27			28			29			30		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	3774,008	1887,004	76,970	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N ₂	159,484	5,696	0,262	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CO	290,443	10,373	0,423	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CO ₂	20519,991	466,363	19,023	22115,809	502,632	1,327	22115,809	502,632	1,327	22115,809	502,632	1,327
CH ₄	976,529	61,033	2,490	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
C ₂ +	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	380,354	21,131	0,862	642006,900	35667,050	94,170	642006,900	35667,050	94,170	642006,900	35667,050	94,170
MEA	0,000	0,000	0,000	104174,593	1705,543	4,503	104174,593	1705,543	4,503	104174,593	1705,543	4,503
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	26100,808	2451,600	100,000	768297,302	37875,225	100,000	768297,302	37875,225	100,000	768297,302	37875,225	100,000

Tabla I.10. Composiciones y caudales de las corrientes 31, 32, 33 y 34

	31			32			33			34		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CO ₂	2211,581	50,263	0,134	2211,581	50,263	0,134	2211,581	50,263	0,134	2211,581	50,263	0,134
CH ₄	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
C ₂ +	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	642006,900	35667,050	95,308	642006,900	35667,050	95,308	642006,900	35667,050	95,308	642006,900	35667,050	95,308
MEA	104174,593	1705,543	4,557	104174,593	1705,543	4,557	104174,593	1705,543	4,557	104174,593	1705,543	4,557
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	748393,074	37422,857	100,000	748393,074	37422,857	100,000	748393,074	37422,857	100,000	748393,074	37422,857	100,000

Tabla I.11. Composiciones y caudales de las corrientes 35, 36 y 37

	35			36			37		
	kg/h	kmol/h	% mol.	kg/h	kg/h	kg/h	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3774,008	1887,004	94,386
N ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	159,484	5,696	0,285
CO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	290,443	10,373	0,519
CO ₂	19904,228	452,369	99,99	0,000	0,000	0,000	615,763	13,995	0,700
CH ₄	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	976,529	61,033	3,053
C ₂ +	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	0,814	0,045	0,010	0,814	0,045	100,000	380,354	21,131	1,057
MEA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	19905,042	452,414	100,000	0,814	0,045	100,000	6196,580	1999,23	100,000

4.3 Balance de materia a la unidad de PSA: Corrientes 37, 38 y 41

La corriente 37 de salida del absorbedor C-301, con una pureza bastante elevada de H_2 y una baja fracción de CO_2 , se introduce en el sistema de columnas de adsorción por cambio de presión, conocido como PSA (*pressure swing adsorption*). De este sistema saldrán: la corriente 38, parte de la cual se recirculará y otra parte será fuel gas que se obtiene como subproducto, y la corriente 41, la corriente de H_2 producto. Este sistema se muestra esquemáticamente en la Figura I.9.

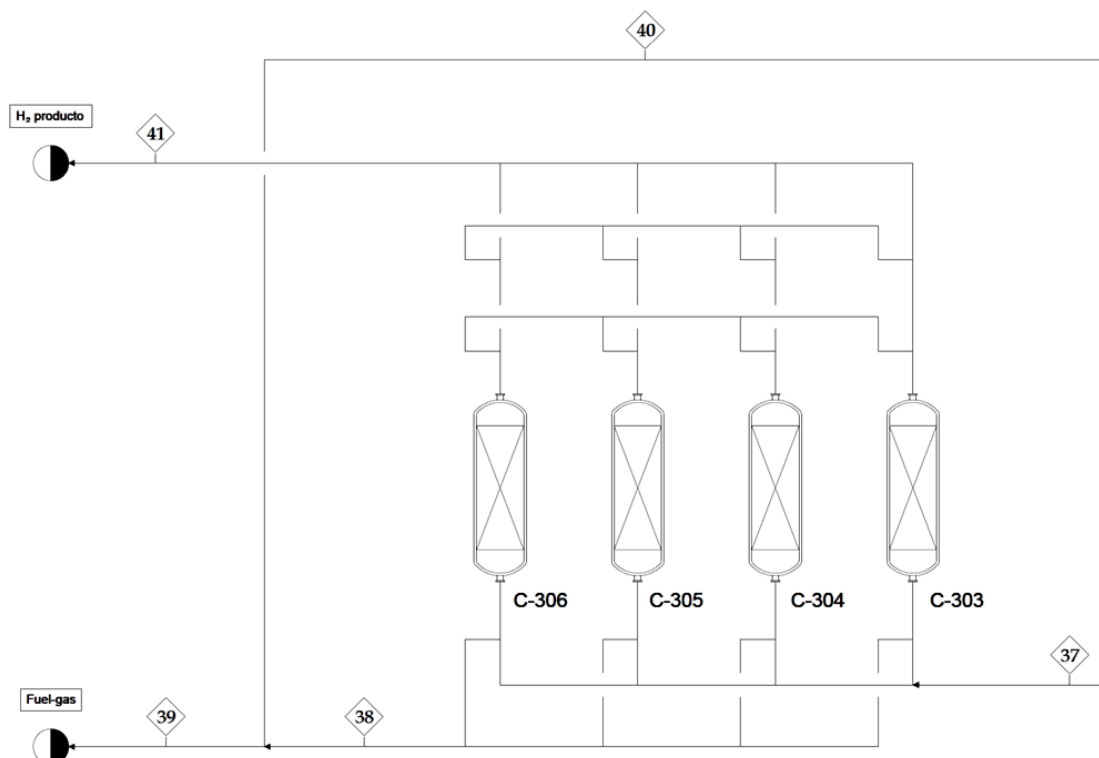


Figura I.9. Corrientes de entrada y salida al sistema de PSA

Para el cálculo de las corrientes de salida del sistema se considera un porcentaje de recuperación de H_2 del 90%, que saldrá, por la corriente 43, con una pureza del 99,9%, acompañado del N_2 que no se consigue adsorber (0,1%). Por la corriente 38 saldrán por lo tanto todos los demás gases, aquellos que son adsorbidos por los lechos de relleno. [6, 7]

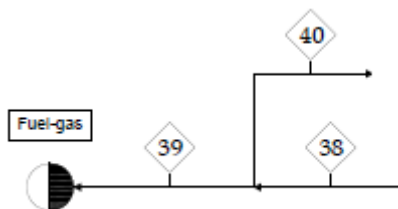
Las composiciones y caudales de las corrientes 38 y 41 se muestran en la Tabla I.12, de forma que se puede comprobar cómo se cumple el balance de materia, ya que mediante la suma de las corrientes 38 y 41 se puede obtener la corriente 37, mostrada en la Tabla I.11.

Tabla I.12. Composiciones y caudales de las corrientes 38 y 41

	38			41		
	kg/h	kg/h	kg/h	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	377,401	188,700	63,062	3396,607	1698,304	99,900
N ₂	111,884	3,996	1,335	47,600	1,700	0,100
CO	290,443	10,373	3,467	0,000	0,000	0,000
CO ₂	615,763	13,995	4,677	0,000	0,000	0,000
CH ₄	976,529	61,033	20,397	0,000	0,000	0,000
C ₂ +	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	380,354	21,131	7,062	0,000	0,000	0,000
MEA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	2752,373	299,228	100,000	3444,207	1700,004	100,000

4.4 Balance de materia a las corrientes 38, 39 y 40

Como se ha dicho, la corriente 38 (Tabla I.13) se divide en una corriente de recirculación (corriente 40) y una corriente de fuel gas como subproducto (corriente 39). Este sistema de corrientes se muestra gráficamente en la Figura I.10.

**Figura I.10.** Relación entre las corrientes 38, 39 y 40

La composición y caudales de las corrientes 39 y 40 se muestran en la Tabla I.13.

Tabla I.13. Composiciones y caudales de las corrientes 39 y 40

	39				40	
	kg/h	kg/h	kg/h	kg/h	kmol/h	% mol.
H ₂	325,880	162,940	63,062	51,521	25,761	63,062
N ₂	96,610	3,450	1,335	15,274	0,545	1,335
CO	250,793	8,957	3,467	39,650	1,416	3,467
CO ₂	531,702	12,084	4,677	84,061	1,901	4,677
CH ₄	843,217	52,701	20,397	133,312	8,332	20,397
C ₂ +	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	328,429	18,246	7,062	51,925	2,885	7,062
MEA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂ S	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	2752,373	299,228	100,000	3444,207	1700,004	100,000

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] ALONSO, T. V. *Energy and performance optimization for H₂S removal from sour gases in refinery units* [sitio web]. The Dow Chemical Company, [consultado el 15 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://oilandgas.dow.com/rio/en/removal.htm>

[2] SANCHEZ ALARCÓN, J. A., PUJOL, R. O., ESTRANY CODA, F. Planta para la recuperación del dióxido de carbono de los gases de combustión. *Técnica Industrial*, 2006, volumen 261, 35-41. ISSN 0040-1838

[3] ERTL, G., KNOZINGER, H., WEITKAMP, J., *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, Volumen 4. 1ª edición, Weinheim (Alemania): Wiley-VCH, 1997. ISBN 3-527-29212-8

[4] TWIGG, M. V., *Catalyst handbook*. 2ª edición, Londres: Wolfe Publishing, 1989. ISBN 0-7234-0857-2

[5] KHAN, A. A., HALDER, G. N., SAHA, A. K. Carbon dioxide capture characteristics from flue gas using aqueous 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) and monoethanolamine (MEA) solutions in packed bed absorption and regeneration columns. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, volumen 32, 15-23. ISSN 1750-5836

[6] LOPES, F., GRANDE, C. A., RODRIGUES, A. E. Activated carbón for hydrogen purification by pressure swing adsorption: Multicomponent breakthrough curves and PSA performance. *Chemical Engineering Science*, 2011, volume 66, 303-317. ISSN 0009-2509

[7] UNION CARBIDE CO. *Pressure swing adsorption process and system*. Inventor: Andrija FUDERER. United States patent application number: 315,418. Publicada el 26 de abril de 1983.

Anexo II.

Balances de energía

Planta de Producción de Hidrógeno por

Reformado de Gas Natural

INDICE ANEXO II

1. INTRODUCCIÓN	4
2. PRETRATAMIENTO DE LA ALIMENTACIÓN (SECCIÓN 100).....	9
2.1 Columna de absorción C-101: Corrientes 1, 2, 9 y 11	9
2.2 Columna de desorción C-102: Corrientes 4, 5, 6 y 10	11
2.2.1 Condensador de la columna C-102.....	12
2.2.2 <i>Reboiler</i> de la columna C-102	14
2.3 Calentamiento y despresurización de la corriente rica en CO ₂ y H ₂ S del absorbedor C-101: Corrientes 2, 3 y 4	16
2.4 Compresión y enfriamiento de la corriente pobre del desorbedor C-102: Corrientes 6, 7, 8 y 9.....	17
3. SECCIÓN DE REACCIÓN QUÍMICA (SECCIÓN 200).....	19
3.1 Compresor K-202 y recirculación de hidrógeno: Corrientes 12 y 40	19
3.2 Unión de la alimentación desulfurada con el hidrógeno recirculado: Corrientes 11, 12 y 13.....	20
3.3 Compresor K-201: Corrientes 13 y 14.....	21
3.4 Unión de la alimentación con la corriente de vapor: Corrientes 14, 15 y 16	22
3.5 Precalentamiento de la alimentación al reformador R-201 en E-201: Corrientes 16 y 17.....	23
3.6 Reformador R-201: Corrientes 17 y 18.....	24
3.7 Enfriamiento previo y balance del reactor HTS R-202: Corrientes 18, 19 y 20	26
3.8 Enfriamiento previo y balance del reactor LTS R-203: Corrientes 20, 21 y 22.....	28
4. SEPARACIÓN Y PURIFICACIÓN (SECCIÓN 300)	30
4.1 Enfriamiento en E-301 y separador de condensados S-301: Corrientes 22, 23, 24 y 25.....	30
4.2 Compresor K-301 y enfriamiento posterior en E-302: Corrientes 25, 26 y 27	31

4.3	Columna de absorción C-301: Corrientes 27, 28, 34 y 37	33
4.4	Columna de desorción C-302: Corrientes 30, 31, 35 y 36	34
4.4.1	Condensador E-306 de la columna C-302	35
4.4.2	<i>Reboiler</i> E-304 de la columna C-302.....	36
4.5	Calentamiento y despresurización de la corriente rica en CO ₂ del absorbedor C-301: Corrientes 28, 29 y 30	38
4.6	Compresión y enfriamiento de la corriente pobre del desorbedor C-302: Corrientes 31, 32, 33 y 34.....	40
4.7	Purificación del hidrógeno producido en el PSA y recirculación: Corrientes 37, 38, 39, 40 y 41	41
5.	BIBLIOGRAFÍA	43

1. INTRODUCCIÓN

A continuación se planteará el balance de energía del proceso, determinando el calor aportado o retirado en cada unidad. Para ello se parte de la ecuación general del balance de energía: [1]

$$[Entrada - Salida] = [Acumulación] \quad (1.1)$$

Donde:

[Entrada-Salida]: diferencia entre la energía de entrada y salida

[Acumulación]: término debido a la acumulación de energía en situaciones no estacionarias

Debido a que todo el proceso trabaja de forma estacionaria, el término acumulación es igual a cero para todos los balances de energía. La generación no se considera debido a que en la industria química no se produce ni se destruye energía.

Debido a la posibilidad de que exista transferencia de energía entre el sistema y los alrededores, la ecuación 1.1 se transforma en: [1]

$$\begin{aligned} \text{Energía final del sistema} - \text{Energía inicial del sistema} = \\ = \text{Energía neta transferida al sistema} \end{aligned} \quad (1.2)$$

Donde, a su vez, cada término es:

$$\text{Energía final del sistema} = (U_f + E_{kf} + E_{pf}) \cdot F \quad (1.3)$$

$$\text{Energía inicial del sistema} = (U_i + E_{ki} + E_{pi}) \cdot F \quad (1.4)$$

$$\text{Energía neta transferida} = Q - W \quad (1.5)$$

Donde:

U_f : Energía interna final

E_{kf} : Energía cinética final

E_{pi} : Energía potencial inicial

U_i : Energía interna inicial

E_{ki} : Energía cinética inicial

E_{pi} : Energía potencial inicial

F : flujo molar o cantidad de sustancia

Q : Calor transferido al sistema procedente de sus alrededores

W : trabajo realizado por o sobre el sistema

En consecuencia, la ecuación 1.2 se puede reescribir como: [1]

$$(\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p) \cdot F = Q - W \quad (1.6)$$

Para aquellos sistemas en lo que no hay intercambio de calor con el exterior (adiabáticos), Q tendrá un valor nulo. La energía cinética solo se tiene en cuenta en aquellos casos donde se produce una variación en la velocidad del fluido. El cambio de la energía potencial es producido por la elevación o caída del fluido. El trabajo realizado sobre o por el sistema se logra por el desplazamiento de sus fronteras contra un agente externo, como por ejemplo un elemento de impulsión, y por la variación de su volumen o presión.

Por otro lado, es más utilizado el concepto de entalpía que de energía interna, la cual se define como la suma de la energía interna y el trabajo de flujo (trabajo realizado por el fluido debido a cambios de presión o volumen sin presencia de elementos de impulsión como compresores o bombas): [1]

$$H = U + P \cdot V \quad (1.3)$$

Donde:

H : entalpía

P : presión

V : volumen

Entonces, la ecuación 1.6 se transforma en: [1]

$$(\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p) \cdot F = Q - W_s \quad (1.7)$$

Donde W_s es el trabajo realizado por o sobre el fluido por una parte móvil del sistema, como un elemento de impulsión.

Dentro de las aplicaciones de la industria química existen muchas unidades en las que las energías potencial y cinética son despreciables frente a la variación entálpica. Por ello, considerando el trabajo nulo, la ecuación 1.7 se puede reescribir como la ecuación 1.8, donde ΔH es debida al posible calentamiento o enfriamiento del fluido, posible cambio de estado y/o existencia de reacciones químicas: [2]

$$Q = F_{total} \cdot C_{p_{medio}} \cdot (T^{sal} - T^0) + \sum_i F'_i \cdot \lambda_i + \sum_j \xi_j \cdot \Delta H_{R,j}^{T^{sal}} \quad (1.8)$$

Donde:

Q : calor intercambiado (kJ/h)

F_{total} : número de moles totales (kmol/h)

$C_{p_{medio}}$: calor específico medio (kJ/kmol K)

T^{sal} : temperatura de salida (K)

T^0 : temperatura de entrada (K)

F'_i : moles de especie i con cambio de estado (kmol/h)

λ_i : calor de vaporización de la especie i (kJ/kmol)

$\Delta H_{R,j}^{T^{sal}}$: entalpías estándar de reacción a la temperatura de salida T^{sal} del sistema para cada reacción j (kJ/kmol)

ξ_j : grado de avance de cada reacción j (kmol/h)

El grado de avance de cada reacción se calcula como el cociente entre la diferencia de moles de entrada y de salida de un componente i entre su coeficiente estequiométrico. Además de ello, también se puede expresar en función de la conversión de la forma siguiente: [1]

$$\xi_j = \frac{F_i - F_i^0}{\nu_i} = \frac{-\alpha_i \cdot F_i^0}{\nu_i} \quad (1.9)$$

Donde:

F_i : moles de salida de la especie i (kmol/h)

F_i^0 : moles de entrada de la especie i (kmol/h)

v_i : coeficiente estequiométrico de la especie i en la reacción j

α_i : conversión referida a la especie i en la reacción j

Para estimar las entalpías estándar de reacción a cualquier temperatura T se puede aplicar la ley de Hess: [2]

$$\Delta H_{R,j}^T = \sum_i v_i \cdot \Delta H_{F,i}^T \quad (1.10)$$

Donde $\Delta H_{F,i}^T$ es la entalpía de formación para cada componente a una temperatura T (kJ/kmol).

Al mismo tiempo, existe otra alternativa para expresar esta entalpía estándar de reacción a cada temperatura usando la ecuación de Kirchhoff, la cual parte de la entalpía de reacción a una temperatura de referencia, que suele ser 298 K. [2]

$$\Delta H_{R,j}^T = \Delta H_{R,j}^0(298) + \int_{298}^T \sum_i (v_i \cdot C_{p,i}) \cdot dT \quad (1.11)$$

Donde:

v_i : coeficiente estequiométrico de cada especie i

$C_{p,i}$: calor específico de cada especie i (kJ/K kmol)

$\Delta H_R^0(298)$: entalpía de reacción a una temperatura de 298 K (kJ/kmol)

Donde $\Delta H_R^0(298)$ es igual a:

$$\Delta H_{R,j}^0(298) = \sum_i v_i \cdot \Delta H_{F,i}^0(298) \quad (1.12)$$

Siendo $\Delta H_{F,i}^0(298)$ la entalpía de formación para cada componente a 298 K (kJ/kmol). [1]

En la Figura II.1 se representa de forma esquemática las dos formas de calcular la variación de energía en un sistema con cambio de temperatura y reacción química.

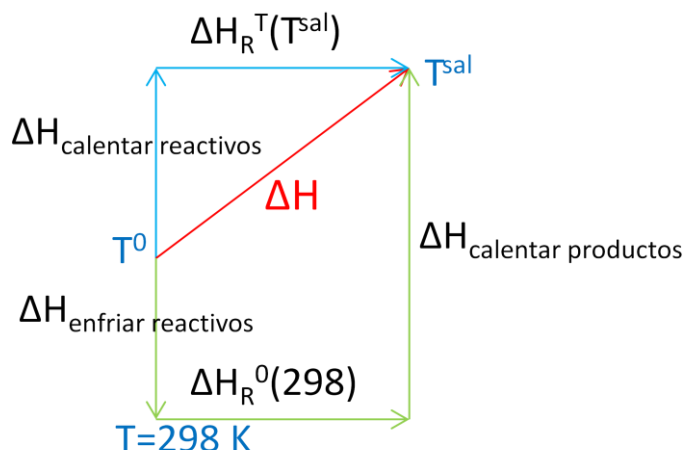


Figura II.1. Esquema de la variación de energía en un proceso con reacción química y cambio de temperatura.
Adaptado de: [2]

La variación entálpica del sistema (ΔH) se corresponde a la línea intermedia (roja). En el camino inferior (verde) el procedimiento de cálculo se basa en el uso de la entalpía de reacción a una temperatura de referencia (ecuación 1.11), con lo que previamente es necesario enfriar los reactivos hasta dicha temperatura y después volver a calentar los productos hasta la temperatura de salida [2]. Por otro lado, el camino superior (azul) utiliza la entalpía de reactor a la temperatura de salida (ecuación 1.10) y requiere el calentamiento previo de los reactivos hasta dicha temperatura.

En el caso de no haber reacción química, la ecuación 1.8 se puede transformar en:

$$Q = n_{total} \cdot C_{p_{mezcla}} \cdot (T^{sal} - T^0) + \sum_i F_i \cdot \lambda_i \quad (1.13)$$

Ecuación válida para cualquier sistema sin reacción ni trabajo que intercambie calor con el exterior.

Por otro lado, existe la posibilidad de la unión de dos corrientes a temperaturas diferentes, por lo que no sería posible conocer a priori la temperatura de salida. Para calcularla, se debe realizar un balance de energía como se muestra a continuación. En este caso solo existe el término [Entrada-Salida], el cual debe obtener un valor igual a cero, con lo que la ecuación 1.1 se transforma en:

$$[Entrada] = [Salida] \quad (1.14)$$

En consecuencia, realizando el balance entálico y reordenando los términos la temperatura de salida se calcula como:

$$T_{mix} = \frac{\sum_k (F_k \cdot C_{p_k} \cdot T_k)}{F_{mix} \cdot C_{p_{mix}}} \quad (1.15)$$

Donde:

F_k : flujo molar de las corrientes de entrada k (kmol/h)

C_{p_k} : calor específico medio de las corrientes de entrada k (kJ/kmol K)

T_k : temperatura de las corrientes de entrada k (K)

F_{mix} : flujo molar de la mezcla de las corrientes de entrada k (kmol/h)

$C_{p_{mix}}$: calor específico medio de la mezcla de las corrientes de entrada k (kJ/kmol K)

T_{mix} : temperatura de la mezcla de las corrientes de entrada k (K)

2. PRETRATAMIENTO DE LA ALIMENTACIÓN (SECCIÓN 100)

2.1 Columna de absorción C-101: Corrientes 1, 2, 9 y 11

El absorbedor C-101 opera de forma adiabática, donde se produce una absorción química con desprendimiento de calor. Se considera que se produce solamente el calentamiento de la fase líquida [3]. En el balance de energía de este equipo se determina la temperatura de la corriente de salida líquida, la corriente 2. Según la bibliografía, la temperatura de la corriente recirculada del desorbedor C-102 de amina pobre (corriente 9) presenta la misma que las corrientes gaseosas (1 y 11), cuyo valor es de 25 °C. [4, 5]

La Figura II.2 recoge una representación esquemática del absorbedor.

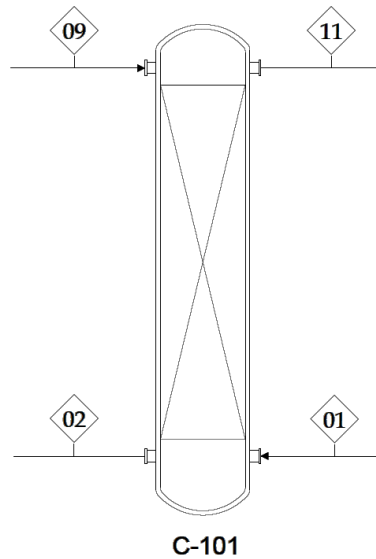
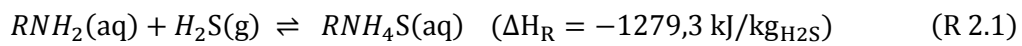


Figura II.2. Esquema del absorbedor C-101 y corrientes 1, 2, 9 y 11

La entalpía de reacción media para la MEA, según el compuesto absorbido, es de 1279,3 kJ/kg_{H₂S} y 454,5 kJ/kg_{CO₂}. Las reacciones que tienen lugar son: [6]



Entonces, a partir de las cantidades que es capaz de retener, se determina el calor generado en dicha columna. La cantidad absorbida de H₂S y CO₂ es la diferencia entre las corrientes 2 y 9, la cual presenta los siguientes valores:

$$F_{H_2S\ ab.} = 12,895 \text{ kg/h}$$

$$F_{CO_2\ ab.} = 21,079 \text{ kg/h}$$

El calor producido por los mecanismos de absorción reactiva se puede calcular con la ecuación 1.10 proporcionando, en total, el siguiente resultado:

$$Q = 5,149 \cdot 10^4 \text{ kJ/h}$$

A continuación, para determinar la temperatura de salida de la corriente líquida (corriente 2) se utiliza la ecuación 1.13 teniendo en cuenta que el absorbedor es adiabático. En la Tabla II.1 se recogen la composición y el calor específico de las corrientes correspondientes.

Tabla II.1. Datos de las corrientes 2 y 9. Fuente de calores específicos: [7, 8]

	2		9	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-	0,000	-
N ₂	0,000	-	0,000	-
CO	0,000	-	0,000	-
CO ₂	0,303	37,221	0,010	37,129
CH ₄	0,000	-	0,000	-
C ₂ +	0,000	-	0,000	-
H ₂ O+MEA	25,232+1,135	100,891	25,232+1,135	95,185
H ₂ S	0,620	34,312	0,000	34,192
T (°C)	43,19		25	

El valor calculado de la temperatura de la corriente 2 es:

$$T_2 = 43,19 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.2 Columna de desorción C-102: Corrientes 4, 5, 6 y 10

En el balance de energía del desorbedor C-102 se determina la energía asociada al *reboiler* y al condensador de dicha unidad. La misión del *reboiler* es producir el vapor necesario dentro de la columna, mientras que el condensador lo volverá a estado líquido.

Se puede representar de forma esquemática la columna, lo cual se muestra en la Figura II.3.

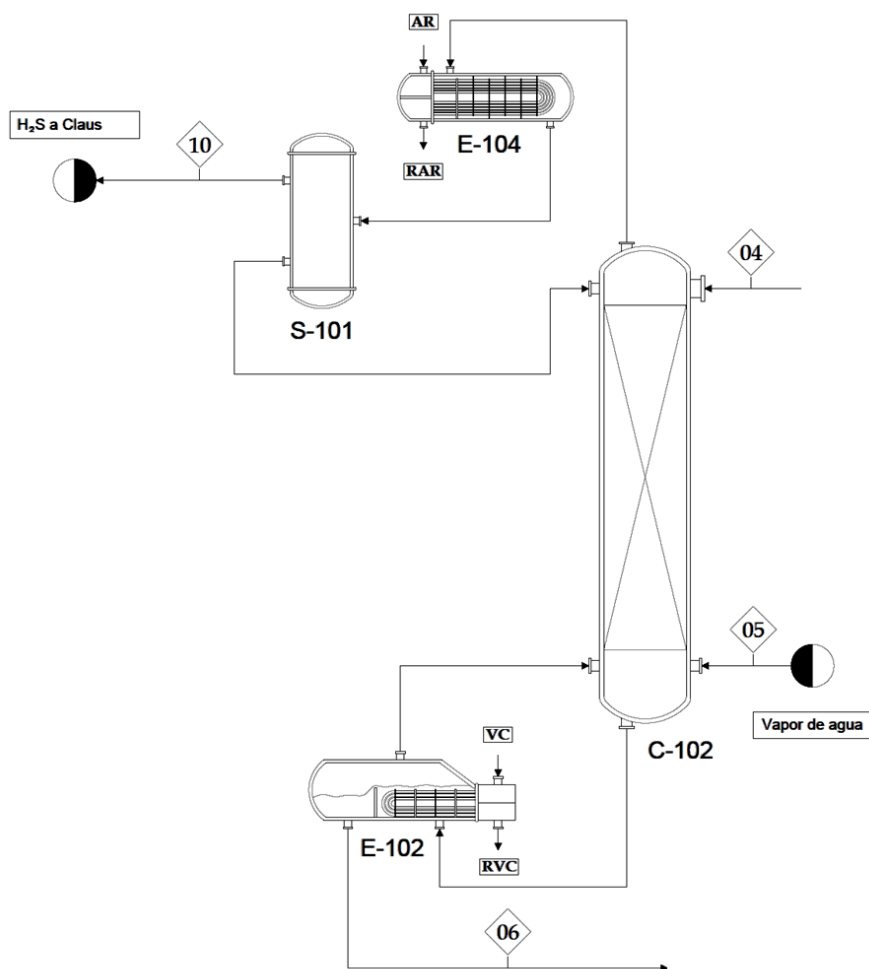


Figura II.3. Esquema del desorbedor C-102 y corrientes 4, 5, 6 y 10

2.2.1 Condensador de la columna C-102

Se trata de un condensador parcial que devuelve la mayor parte del vapor a la columna en estado líquido. Según lo descrito en el Anexo I: Balances de materia, el contenido de agua en la corriente de vapor que sale por la parte superior de la columna es del 25% molar y el resto se corresponde los gases obtenidos como producto de cabezas. Los gases no condensables están formados por el CO_2 y el H_2S desorbidos y una pequeña cantidad de agua.

La temperatura de la parte superior de la columna es la misma que la de la corriente 4, la cual, según la bibliográfica presenta un valor de 101,5 °C. En cambio, los no condensables se recuperan a una temperatura de 30 °C en la corriente 10. [5]

En consecuencia, la energía retirada en el condensador debe ser igual a la necesaria para condensar casi todo el vapor de agua que llega y para enfriarla junto con los no condensables

hasta 30 °C. El vapor que condensa es el vapor que alcanza la parte superior menos el que se pierde junto a los no condensables y se puede calcular como:

$$F_{cond.} = F_{vapor} - F_{vap. no cond.} \quad (2.1)$$

Donde:

$F_{cond.}$: vapor de agua condensado (kmol/h)

$F_{vap. no cond.}$: vapor de agua arrastrado en los no condensados, corriente 10 (kmol/h)

F_{vapor} : moles de vapor de agua que llegan a la parte superior de la columna (kmol/h)

La cantidad de CO₂ y H₂S desorbida es la que contiene la corriente 10, cuyo valor es de 0,913 kmol/h. En consecuencia, la cantidad de vapor de agua que llega a cabezas es:

$$F_{vapor} = 0,304 \text{ kmol/h}$$

El calor latente del agua saturada a 101,5 °C es 2254,7 kJ/kg o 40584,6 kJ/kmol [9]. En la Tabla II.2 se recoge la composición y el calor latente de la corriente que pasa por el condensador.

Tabla II.2. Composición de la corriente de proceso del condensador y calor específico medio entre 30 y 101,5 °C para cada especie. Fuente de calores específicos: [7]

Corriente de proceso del condensador		
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-
N ₂	0,000	-
CO	0,000	-
CO ₂	0,293	39,227
CH ₄	0,000	-
C ₂ +	0,000	-
H ₂ O	0,304	75,388
MEA	0,000	-
H ₂ S	0,620	34,807

A partir de estos datos y de la ecuación 1.13, el calor retirado es:

$$Q = -1,472 \cdot 10^4 \text{ kJ/h}$$

2.2.2 *Reboiler* de la columna C-102

Para determinar el calor aportado en el *reboiler* de la columna se realiza un balance de energía a la columna teniendo en cuenta todas las corrientes de entrada y de salida del desorbedor. En dicho balance se tiene en cuenta la entalpía de cada corriente y el calor retirado en el condensador, cerrando el balance con el calor aportado en el *reboiler*. A partir de la ecuación 1.1, se puede expresar dicho balance como: [2]

$$F_4 \cdot H_4 + F_5 \cdot H_5 + Q_r = F_6 \cdot H_6 + F_{10} \cdot H_{10} + Q_c \quad (2.2)$$

Donde:

F_k : flujo molar de cada corriente k (kmol/h)

H_k : entalpía de cada corriente k por unidad de masa (kJ/h kmol)

Q_r : calor aportado en el *reboiler* (kJ/h)

Q_c : calor retirado en el condensador (kJ/h)

A su vez, las entalpías de cada corriente se pueden determinar a partir de su calor latente y una temperatura de referencia como: [2]

$$H_k = C p_k \cdot (T - T_{ref}) \quad (2.3)$$

Donde:

$C p_k$: calor específico medio de la corriente k (kJ/kmol K)

T : temperatura de la corriente k (K)

T_{ref} : temperatura de referencia (K)

Esto es válido siempre que la temperatura de referencia sea la misma para todas las corrientes.

En las Tablas II.3 y II.4 se recogen los calores específicos y composiciones de las corrientes que intervienen en el absorbedor C-102.

Tabla II.3. Datos de las corrientes 4 y 5. Fuente de calores específicos: [7]

	4		5	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-	0,000	-
N ₂	0,000	-	0,000	-
CO	0,000	-	0,000	-
CO ₂	0,303	41,325	0,000	-
CH ₄	0,000	-	0,000	-
C ₂ +	0,000	-	0,000	-
H ₂ O+MEA	25,232+1,135	102,349	0,001+0,000	34,262
H ₂ S	0,620	35,210	0,000	-
T (°C)	101,5		106,5	

Tabla II.4. Datos de las corrientes 6 y 10. Fuente de calores específicos: [7]

	6		10	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-	0,000	-
N ₂	0,000	-	0,000	-
CO	0,000	-	0,000	-
CO ₂	0,010	41,436	0,293	37,129
CH ₄	0,000	-	0,000	-
C ₂ +	0,000	-	0,000	-
H ₂ O+MEA	25,235+1,135	102,687	0,001+0,000	33,590
H ₂ S	0,000	-	0,620	34,192
T (°C)	106,5		30	

A partir de la información de las Tablas II.3 y II.4 y de la ecuación 2.3, la energía asociada a cada corriente es:

$$F_4 \cdot H_4 = -2,774 \cdot 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$F_5 \cdot H_5 = -3,649 \text{ kJ/h}$$

$$F_6 \cdot H_6 = -2,884 \cdot 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$F_{10} \cdot H_{10} = -9,633 \cdot 10^2 \text{ kJ/h}$$

El calor necesario en el *reboiler* se determina a partir de la ecuación 2.2 proporcionando el siguiente valor:

$$Q = 2,671 \cdot 10^4 \text{ kJ/h}$$

2.3 Calentamiento y despresurización de la corriente rica en CO₂ y H₂S del absorbedor C-101: Corrientes 2, 3 y 4

La corriente líquida rica en los gases absorbidos procedente del absorbedor C-101 (corriente 2) se calienta y despresuriza para poder desorber dicho gases. Para ello, se utiliza el intercambiador de calor E-101, el cual utiliza el calor procedente de la salida líquida pobre en CO₂ y H₂S del desorbedor C-102 (corriente 7). A continuación, se despresuriza de forma adiabática en la válvula V-101.

En la Figura II.4 se muestra la representación esquemática del sistema.

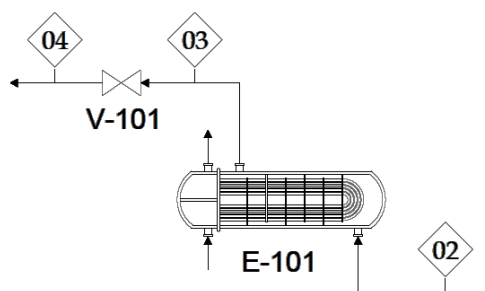


Figura II.4. Esquema del intercambiador E-101 y válvula V-101 con sus corrientes correspondientes

Para poder determinar el poder de calentamiento del intercambiador es necesario saber previamente la diferencia de temperatura requerida. La temperatura de llegada a la columna de desorción debe ser de 101,5 °C con lo que, en primer lugar, se debe realizar el balance de energía a la válvula. Debido a que se trata de un líquido, la variación de su temperatura al pasar por una válvula es despreciable, con lo que se asume que la temperatura de la corriente 3 es igual a la de 4.

En la Tabla II.5 se recogen las composiciones y calores específicos de las corrientes de entrada y salida del intercambiador E-101.

Tabla II.5. Datos de las corrientes 2 y 3. Fuente de calores específicos: [7]

	2		3	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-	0,000	-
N ₂	0,000	-	0,000	-
CO	0,000	-	0,000	-
CO ₂	0,303	37,221	0,303	41,325
CH ₄	0,000	-	0,000	-
C ₂ +	0,000	-	0,000	-
H ₂ O+MEA	25,232+1,135	100,891	25,232+1,135	102,349
H ₂ S	0,620	34,312	0,620	35,210
T (°C)	43,19		101,5	

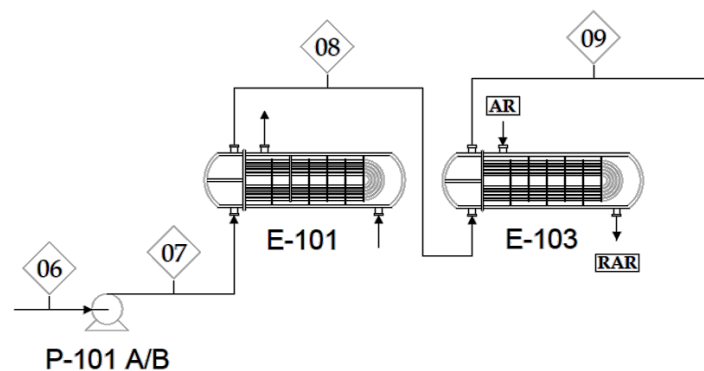
A partir de los datos aportados en la Tabla II.5, se determina el valor del calor aportado con la ecuación 1.13:

$$Q = 1,582 \cdot 10^5 \text{ kJ/h}$$

2.4 Compresión y enfriamiento de la corriente pobre del desorbedor C-102: Corrientes 6, 7, 8 y 9

La corriente líquida pobre en CO₂ y H₂S procedente del desorbedor C-102 (corriente 6) se enfría y presuriza para ser alimentada en la columna de absorción C-101. Para ello, se utiliza la bomba P-101 A/B y el intercambiador de calor E-101 donde, como se comentó con anterioridad, intercambia calor con la corriente rica procedente de C-101.

En la Figura II.5 se representa este sistema y las corrientes asociadas a ellos.

**Figura II.5.** Esquema de la bomba P-101 A/B, intercambiadores E-101 y E-103 y corrientes 6, 7, 8 y 9

El cálculo de la energía requerida en la bomba se realiza con el simulador de procesos Aspen HYSYS. Se asume que por ser un líquido a comprimir no existe una variación de su temperatura apreciable. La energía necesaria para comprimir el caudal de la corriente 6 (26,378 kmol/h) de 0,12 a 1,3 MPa es:

$$P = 0,188 \text{ kW}$$

Asumiendo una eficiencia adiabática del 75%, la potencia consumida por la bomba es:

$$P' = 0,251 \text{ kW}$$

Por otro lado, el calor intercambiado en E-101 es menor al requerido por la corriente 6. Por ello, es necesario utilizar un segundo equipo de enfriamiento para alcanzar la temperatura requerida.

Los datos de las corrientes que intervienen en este sistema se recogen en la Tabla II.6.

Tabla II.6. Datos de las corrientes 6, 7, 8 y 9. Fuente de calores específicos: [7]

	7		8		9	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-	0,000	-	0,000	-
N ₂	0,000	-	0,000	-	0,000	-
CO	0,000	-	0,000	-	0,000	-
CO ₂	0,010	41,436	0,010	37,232	0,010	37,129
CH ₄	0,000	-	0,000	-	0,000	-
C ₂ +	0,000	-	0,000	-	0,000	-
H ₂ O	25,232		25,232		25,232	
+MEA	+1,235	102,687	+1,235	100,902	+1,235	95,185
H ₂ S	0,000	-	0,000	34,324	0,000	34,192
T (°C)	106,5		47,27		25	

Aplicando la ecuación 1.13 al primer intercambiador se puede calcular la temperatura de salida del mismo (corriente 8), obteniéndose el siguiente valor:

$$T_8 = 47,27 \text{ °C}$$

El calor necesario en el intercambiador E-103 será aquel que sea capaz de enfriar la corriente 8 hasta la temperatura de cabezas del absorbedor C-101. En consecuencia, a partir de la ecuación 1.13 se llega al siguiente resultado:

$$Q = -5,780 \cdot 10^4 \text{ kJ/h}$$

3. SECCIÓN DE REACCIÓN QUÍMICA (SECCIÓN 200)

3.1 Compresor K-202 y recirculación de hidrógeno: Corrientes 12 y 40

El cálculo de la potencia suministrada por el compresor se realiza aplicando el método propuesto en *Applied process design* de E. E. Ludwig [10]. El objetivo es determinar la energía necesaria para comprimir la recirculación de hidrógeno procedente del PSA hasta la presión requerida. Además de ello, se calcula el número de etapas de compresión necesarias y la temperatura de salida.

La Figura II.6 representa de forma gráfica el compresor y las corrientes correspondientes.

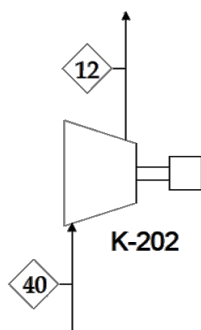


Figura II.6. Esquema del compresor K-202 y corrientes 12 y 40

En la Tabla II.7 se recogen los resultados obtenidos para el compresor de reciclo de hidrógeno.

Tabla II.7. Balance de energía del compresor de reciclo de hidrógeno K-202. Fuente: [10]

Variable	Etapas 1
Presión entrada (MPa)	0,35
Presión salida (MPa)	1,30
Temperatura entrada (°C)	30
Temperatura salida (°C)	41
Caudal másico (kg/h)	375,743
Ratio de compresión	3,71
Eficiencia (%)	87
Potencia (kW)	1,5

3.2 Unión de la alimentación desulfurada con el hidrógeno recirculado: Corrientes 11, 12 y 13

La corriente 13 es el resultado de la unión de las corrientes 11 y 12, la salida gas de la columna de absorción C-101 y los gases residuales de PSA después del compresor K-202, respectivamente. En la Figura II.7 se recoge un esquema de estas corrientes.

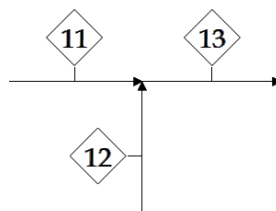


Figura II.7. Esquema de la conexión entre las corrientes 11, 12 y 13

En este caso, el objetivo del balance de energía es determinar la temperatura de la corriente 13, la cual se corresponde a la temperatura de mezclado de 11 y 12.

A continuación, en la Tabla II.8, se muestran los caudales y calores específicos de cada corriente:

Tabla II.8. Datos de las corrientes 11 y 12. Fuente de calores específicos: [7, 8]

	11		12	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	28,836	25,761	28,856
N ₂	5,150	29,124	0,545	29,163
CO	0,000	29,142	1,416	29,189
CO ₂	2,396	37,129	1,910	37,712
CH ₄	488,754	35,639	8,332	36,034
C ₂ +	17,998	52,490	0,000	54,510
H ₂ O	0,000	33,590	2,885	33,765
MEA	0,000	-	0,000	-
H ₂ S	0,000	-	0,000	-
T (°C)	25		40,9	

A partir de la ecuación 1.15, se obtiene un valor de la temperatura de la corriente 13 de:

$$T_{13} = 26,02^{\circ}\text{C}$$

3.3 Compresor K-201: Corrientes 13 y 14

El balance de energía al compresor se realiza empleando la base de cálculo del fabricante *DresserRand DATUM*. El objetivo es determinar la energía necesaria para comprimir la alimentación del reformador R-201 hasta la presión requerida. Además de ello, se calcula el número de etapas de compresión necesarias y la temperatura de salida. [11]

La Figura II.8 representa de forma gráfica el compresor y las corrientes correspondientes.

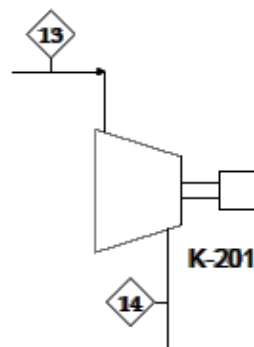


Figura II.8. Esquema del compresor K-201 y corrientes 13 y 14

En la Tabla II.9 se recogen los resultados obtenidos para el compresor K-201.

Tabla II.9. Balance de energía del compresor K-201. Fuente: [11]

Variable	Etapas 1
Presión entrada (MPa)	1,3
Presión salida (MPa)	1,9
Temperatura entrada (°C)	26
Temperatura salida (°C)	61
Caudal másico (kg/h)	8983,396
Ratio de compresión	1,46
Eficiencia (%)	75
Potencia (kW)	201
Velocidad (rpm)	20560

3.4 Unión de la alimentación con la corriente de vapor: Corrientes 14, 15 y 16

La corriente 16 es el resultado de la unión de las corrientes 14 y 15, la salida del compresor K-202 y vapor de agua, respectivamente. Esta unión se muestra en la Figura II.9.

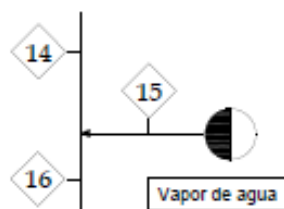


Figura II.9. Esquema de la conexión entre las corrientes 14, 15 y 16

En este caso, el objetivo del balance de energía es determinar la temperatura de la corriente 16, la cual se corresponde a la temperatura de mezclado de 14 y 15.

A continuación, en la Tabla II.10, se muestran los caudales y calores específicos de cada corriente:

Tabla II.10. Datos de las corrientes 14 y 15. Fuente de calores específicos: [7, 8]

	14		15	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	25,761	29,081	0,000	29,250
N ₂	5,696	29,165	0,000	29,423
CO	1,416	29,242	0,000	29,794
CO ₂	4,307	39,273	0,000	44,627
CH ₄	497,086	37,874	0,000	44,856
C ₂ +	17,998	59,085	0,000	77,940
H ₂ O	2,885	33,873	1616,416	35,226
MEA	0,000	-	0,000	-
H ₂ S	0,000	-	0,000	-
T (°C)	61		250	

A partir de la ecuación 1.15, se obtiene un valor de la temperatura de la corriente 16 de:

$$T_{16} = 198,88 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3.5 Precalentamiento de la alimentación al reformador R-201 en E-201: Corrientes 16 y 17

Para precalentar la alimentación al reformador a la temperatura adecuada se utiliza su sección de convección denominada E-201. En la Figura II.10 se representa un esquema de dicho elemento, así como de sus principales corrientes.

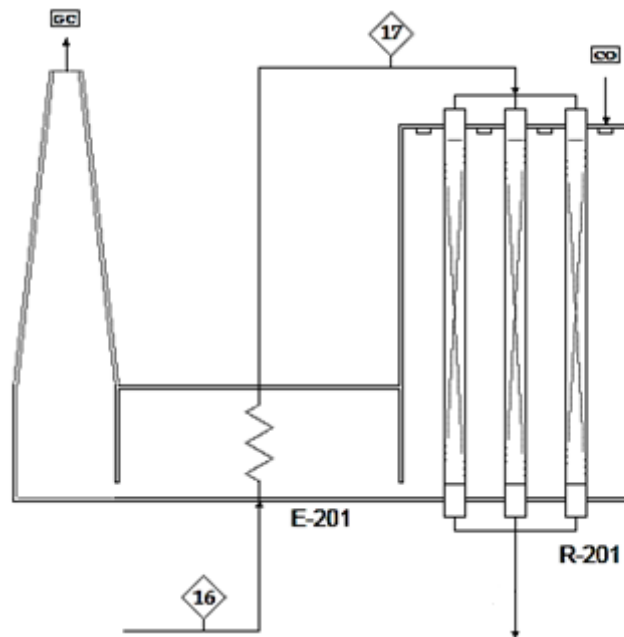


Figura II.10. Esquema de la sección de convección E-201 y corrientes 16 y 17

Las principales propiedades de las corrientes 16 y 17 se recogen en la Tabla II.11.

Tabla II.11. Datos de las corrientes 16 y 17. Fuente de calores específicos: [7, 8]

	16		17	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	25,761	29,250	25,761	29,624
N ₂	5,696	29,423	5,696	31,433
CO	1,416	29,794	1,416	31,899
CO ₂	4,307	44,627	4,307	51,434
CH ₄	497,086	44,856	497,086	62,932
C ₂ +	17,998	77,940	17,998	107,940
H ₂ O	1619,301	35,226	1619,301	38,721
MEA	0,000	-	0,000	-
H ₂ S	0,000	-	0,000	-
T (°C)	198,88		477	

Para el cálculo del calor necesario se parte del calor específico medio de las dos corrientes y mediante el uso de la ecuación 1.13, se obtiene un valor de:

$$Q = 2,489 \cdot 10^7 \text{ kJ/h}$$

3.6 Reformador R-201: Corrientes 17 y 18

En la Figura II.11 se muestra la representación simplificada del reformador y sus corrientes. En este equipo es necesario aportar el calor necesario para calentar la alimentación desde los 477 °C hasta los 880 °C para favorecer la cinética y por el carácter endotérmico de las reacciones que tienen lugar.

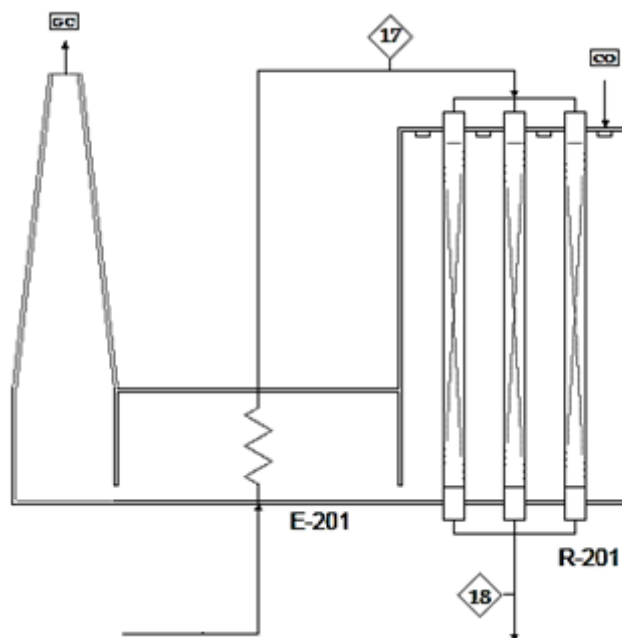


Figura II.11. Esquema del reformador R-201 y corrientes 17 y 18

En la Tabla II.12 se recogen las propiedades de las corrientes 17 y 18 y en la Tabla II.13 las entalpías de formación de las especies que intervienen en las reacciones.

Tabla II.12. Datos de las corrientes 17 y 18. Fuente de calores específicos: [7, 8]

	17		18	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	25,761	29,624	1577,224	30,992
N ₂	5,696	31,433	5,696	33,723
CO	1,416	31,899	320,153	34,175
CO ₂	4,307	51,434	157,619	56,342
CH ₄	497,086	62,932	61,033	78,833
C ₂ +	17,998	107,940	0,000	133,800
H ₂ O	1619,301	38,721	993,938	43,768
MEA	0,000	-	0,000	-
H ₂ S	0,000	-	0,000	-
T (°C)	477		880	

Tabla II.13. Calores de formación de las especies que intervienen en el reformador R-201 a 880 °C. Fuente: [7, 8]

	ΔH_f (kJ/mol)
H ₂	0,000
CO	-112,902
CO ₂	-394,944
CH ₄	-91,094
C ₂ +	-84,670
H ₂ O	-248,728

El balance de energía en el reformador ya está considerado dentro de su diseño en el Anexo III: Cálculos justificativos.

El calor necesario para la reacción es:

$$Q = 1,410 \cdot 10^8 \text{ kJ/h}$$

Aún así, debido a lo explicado en dicho apartado, la energía suministrada por el reformador es mayor. Por ello, según la capacidad de la presente planta, de acuerdo a la bibliografía, se puede estimar que el gasto total de energía es aproximadamente de 60 MW.

3.7 Enfriamiento previo y balance del reactor HTS R-202: Corrientes 18, 19 y 20

La corriente de salida del reformador es necesario enfriarla hasta la temperatura correspondiente a los requerimientos del reactor R-202. Este equipo se corresponde a un reactor adiabático en el que se producen reacciones con liberación de calor. Debido a que la temperatura de salida es fijada previamente para obtener la conversión deseada, según lo explicado en el Anexo I: Balances de materia, es necesario determinar la temperatura de entrada al mismo.

En primer lugar, la Figura II.12 representa esquemáticamente el enfriamiento previo al reactor HTS y dicho reactor.

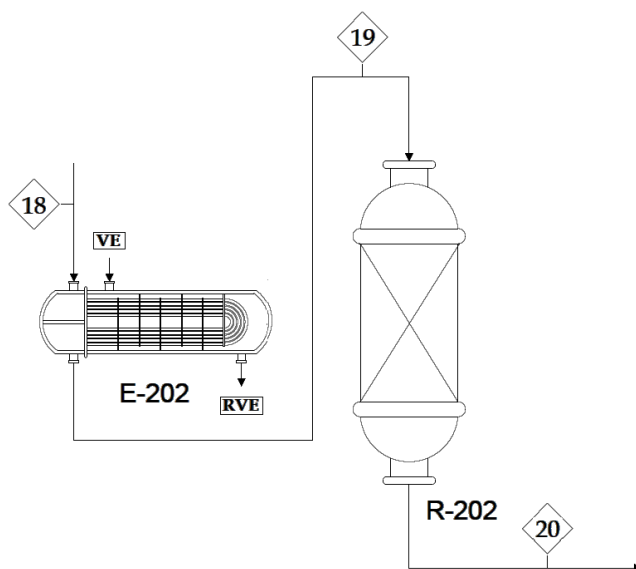


Figura II.12. Esquema del intercambiador E-202, reactor R-202 y corrientes 18, 19 y 20

En las Tablas II.14 y II.15 se recoge la información necesaria de las corrientes correspondientes.

Tabla II.14. Datos de las corrientes 18, 19 y 20. Fuente de calores específicos: [7, 8]

	18		19		20	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	1577,224	30,992	1577,224	29,412	1782,122	29,441
N ₂	5,696	33,723	5,696	30,365	5,696	30,754
CO	320,153	34,175	320,153	30,814	115,255	31,171
CO ₂	157,619	56,342	157,619	48,026	362,517	49,564
CH ₄	61,033	78,833	61,033	54,239	61,033	57,794
C ₂ +	0,000	-	0,000	-	0,000	-
H ₂ O	993,938	43,768	993,938	36,897	789,040	37,495
MEA	0,000	-	0,000	-	0,000	-
H ₂ S	0,000	-	0,000	-	0,000	-
T (°C)	880		376,46		450	

Tabla II.15. Calores de formación de las especies que intervienen en el reactor R-202 a 450 °C. Fuente: [7]

	ΔH_f (kJ/mol)
H ₂	0,000
CO	-110,356
CO ₂	-393,901
H ₂ O	-245,269

La temperatura de la corriente 19 es determinada realizando un balance de energía al reactor HTS a partir de la ecuación 1.8. Debido a que es adiabático, todo el calor producido por la reacción se invierte en calentar la alimentación, con lo que el término Q debe valer cero. En consecuencia, a partir de los datos aportados, se obtiene que el calor desprendido por la reacción y la temperatura de entrada son:

$$\sum_j \xi_j \cdot \Delta H_{R,j}^0(T^{sal}) = -7,843 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}$$

$$T_{19} = 376,46 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

En siguiente paso es calcular cuánto calor es necesario retirar en el intercambiador E-202 utilizando la ecuación 1.13, la cual proporciona el siguiente valor:

$$Q = -5,569 \cdot 10^7 \text{ kJ/h}$$

3.8 Enfriamiento previo y balance del reactor LTS R-203: Corrientes 20, 21 y 22

De nuevo, el reactor LTS es un equipo adiabático donde la temperatura de salida fue fijada previamente en el Anexo I: Balances de materia para alcanzar la conversión adecuada. En consecuencia, se prosigue el mismo procedimiento que en el Apartado 3.7 y en primer lugar se determina la temperatura de entrada al reactor, la corriente 21. Por último, se calcula el calor retirado en el intercambiador E-203.

En la Figura II.13 se muestra la representación esquemática del sistema.

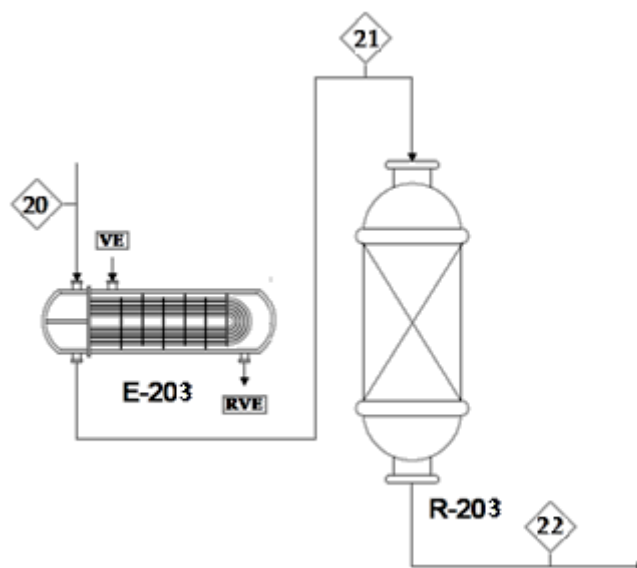


Figura II.13. Esquema del intercambiador E-203, reactor R-203 y corrientes 20, 21 y 22

Los datos de las corrientes y de las entalpías de formación de las especies se recogen en las Tablas II.16 y II.17.

Tabla II.16. Datos de las corrientes 20, 21 y 22. Fuente de calores específicos: [7]

	20		21		22	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	1782,122	29,441	1782,122	29,229	1887,004	29,250
N ₂	5,696	30,754	5,696	29,387	5,696	29,432
CO	115,255	31,171	115,255	29,498	10,373	29,794
CO ₂	362,517	49,564	362,517	43,001	467,399	44,627
CH ₄	61,033	57,794	61,033	43,374	61,033	44,856
C ₂ +	0,000	-	0,000	-	0,000	-
H ₂ O	789,040	37,495	789,040	35,262	684,158	35,226
MEA	0,000	-	0,000	-	0,000	-
H ₂ S	0,000	-	0,000	-	0,000	-
T (°C)	450		179,41		220	

Tabla II.17. Calores de formación de las especies que intervienen en el reactor R-203 a 220 °C. Fuente: [7]

	ΔH_f (kJ/mol)
H ₂	0,000
CO	-110,003
CO ₂	-393,666
H ₂ O	-243,826

El calor desprendido por la reacción que tiene lugar y la temperatura de entrada del reactor presentan los siguientes valores a partir de la ecuación 1.8:

$$\sum_j \xi_j \cdot \Delta H_{R,j}^{Tsal} = -4,178 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}$$

$$T_{21} = 179,41 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

El calor retirado en el intercambiador E-203 se calcula utilizando la ecuación 1.13, proporcionando el siguiente valor:

$$Q = -2,838 \cdot 10^7 \text{ kJ/h}$$

4. SEPARACIÓN Y PURIFICACIÓN (SECCIÓN 300)

4.1 Enfriamiento en E-301 y separador de condensados S-301: Corrientes 22, 23, 24 y 25

Para eliminar el vapor de agua presente en la corriente de salida del reactor R-203 se procede a su enfriamiento en el intercambiador E-301 para forzar a que ésta condense y pueda ser eliminada en el separador de condensados S-301. En la Figura II.14 se representa esquemáticamente el intercambiador, el separador y sus corrientes.

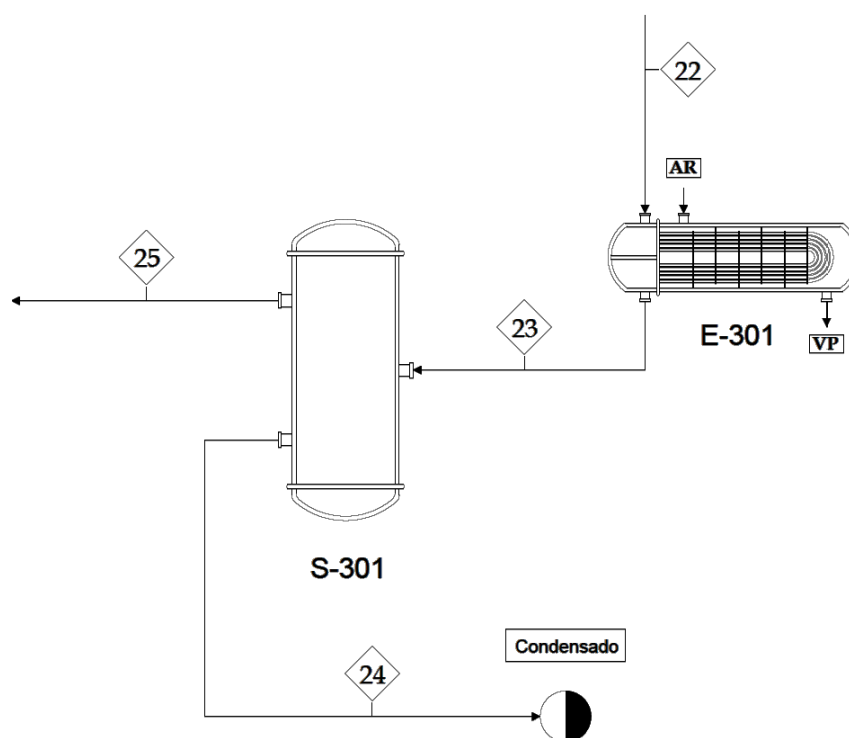


Figura II.14. Esquema del intercambiador E-301, separador de condensados S-301 y corrientes 22, 23, 24 y 25

En la Tabla II.18 se muestran los calores específicos y caudales de las corrientes 22 y 23.

Tabla II.18. Datos de las corrientes 22 y 23. Fuente de calores específicos: [7]

	22		23	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	1887,004	29,250	1887,004	28,836
N ₂	5,696	29,432	5,696	29,124
CO	10,373	29,794	10,373	29,142
CO ₂	467,399	44,627	467,399	37,129
CH ₄	61,033	44,856	61,033	35,639
C ₂ +	0,000	-	0,000	-
H ₂ O	684,158	35,226	684,158	75,962
MEA	0,000	-	0,000	-
H ₂ S	0,000	-	0,000	-
T (°C)	220		30	

El calor latente de la corriente 22 a su temperatura de rocío de 137,1 °C es de $3,073 \cdot 10^4$ kJ/kmol según el simulador de procesos Aspen HYSYS. La cantidad de agua condensada dada por dicho programa son 663,027 kmol/h.

A partir de estos datos, la energía retirada en el intercambiador E-301 utilizando la ecuación 1.13 es:

$$Q = -4,220 \cdot 10^7 \text{ kJ/h}$$

El separador de condensados S-301 es un equipo que carece de intercambio de calor y en el que no hay transformación química. En consecuencia, la temperatura de las corrientes de salida (24 y 25) es igual a la de la entrada (23). Por ello, no es necesario realizar el balance de energía a esta unidad.

4.2 Compresor K-301 y enfriamiento posterior en E-302: Corrientes 25, 26 y 27

El balance de energía al compresor se realiza empleando la base de cálculo del fabricante *DresserRand DATUM*. El objetivo es determinar la energía necesaria para comprimir la salida del reactor R-203 hasta la presión requerida en la siguiente unidad. Además de ello, se calcula el número de etapas de compresión necesarias y la temperatura de salida. [11]

La Figura II.15 representa de forma gráfica el compresor K-301, el intercambiador E-302 y las corrientes correspondientes.

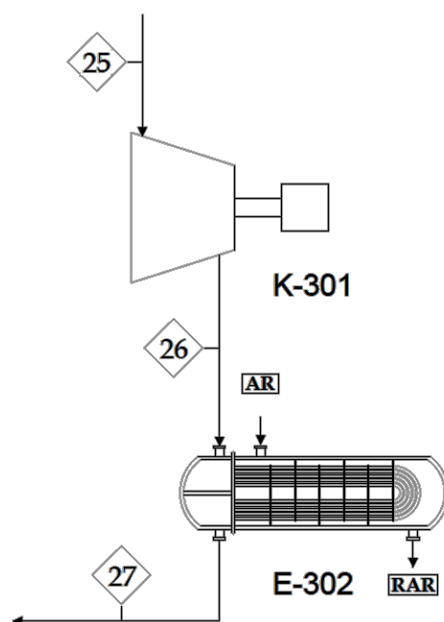


Figura II.15. Esquema del compresor K-301, intercambiador E-302 y corrientes 25, 26 y 27

Los resultados obtenidos en el balance de energía del compresor K-301 se recogen en la Tabla II.19.

Tabla II.19. Balance de energía del compresor K-301. Fuente: [11]

Variable	Etapas 1
Presión entrada (MPa)	1,6
Presión salida (MPa)	2,0265
Temperatura entrada (°C)	30
Temperatura salida (°C)	53
Caudal másico (kg/h)	26100,808
Ratio de compresión	1,27
Eficiencia (%)	83
Potencia (kW)	626
Velocidad (rpm)	20560

A continuación, se procede a realizar el balance de energía del intercambiador E-302. Este equipo es necesario debido a que la temperatura de entrada del equipo siguiente (columna de absorción C-301) es menor a la de salida del compresor.

Las principales propiedades de las corrientes 26 y 27 para el cálculo del calor intercambiado se recogen en la Tabla II.20.

Tabla II.20. Datos de las corrientes 26 y 27. Fuente de calores específicos: [7]

	26		27	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	1887,004	28,849	1887,004	28,836
N ₂	5,696	29,125	5,696	29,124
CO	10,373	29,142	10,373	29,142
CO ₂	466,363	37,221	466,363	37,129
CH ₄	61,033	35,708	61,033	35,639
C ₂ +	0,000	-	0,000	-
H ₂ O	21,131	33,596	21,131	33,590
MEA	0,000	-	0,000	-
H ₂ S	0,000	-	0,000	-
T (°C)	53		30	

Una vez conocida la diferencia de temperatura requerida, se puede calcular el calor retirado a partir de la ecuación 1.13, proporcionando el siguiente valor:

$$Q = -1,728 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}$$

4.3 Columna de absorción C-301: Corrientes 27, 28, 34 y 37

El absorbedor C-301 opera de forma adiabática, donde se produce una absorción química con desprendimiento de calor. En consecuencia, se produce el calentamiento de la fase líquida, de acuerdo a las consideraciones realizadas en el diseño del sistema de separación dentro del Anexo III: Cálculos justificativos. El balance de energía de este equipo se detalla en dicho apartado, en el cual se determina la temperatura de salida de la corriente líquida rica en CO₂, la corriente 28.

La Figura II.16 recoge una representación esquemática del absorbedor.

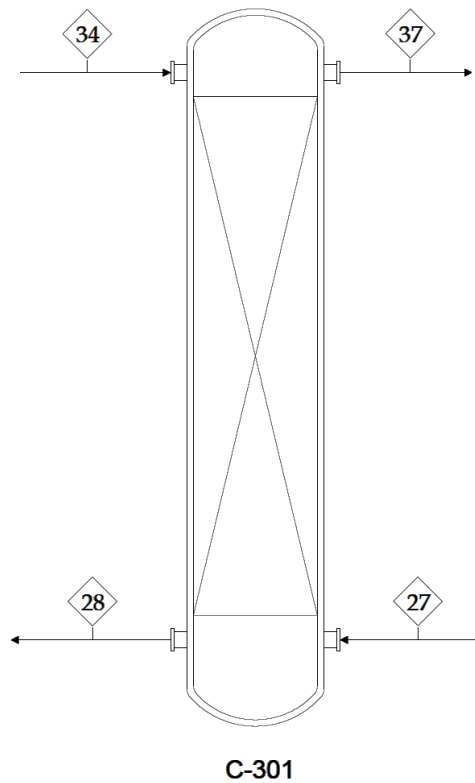


Figura II.16. Esquema del absorbedor C-301 y corrientes 27, 28, 34 y 37

4.4 Columna de desorción C-302: Corrientes 30, 31, 35 y 36

En el balance de energía del desorbedor C-302 se determina la energía asociada al *reboiler* y al condensador de dicha unidad de igual manera que se realizó con anterioridad para la columna C-102.

Se puede representar de forma esquemática la columna, lo cual se muestra en la Figura II.17.

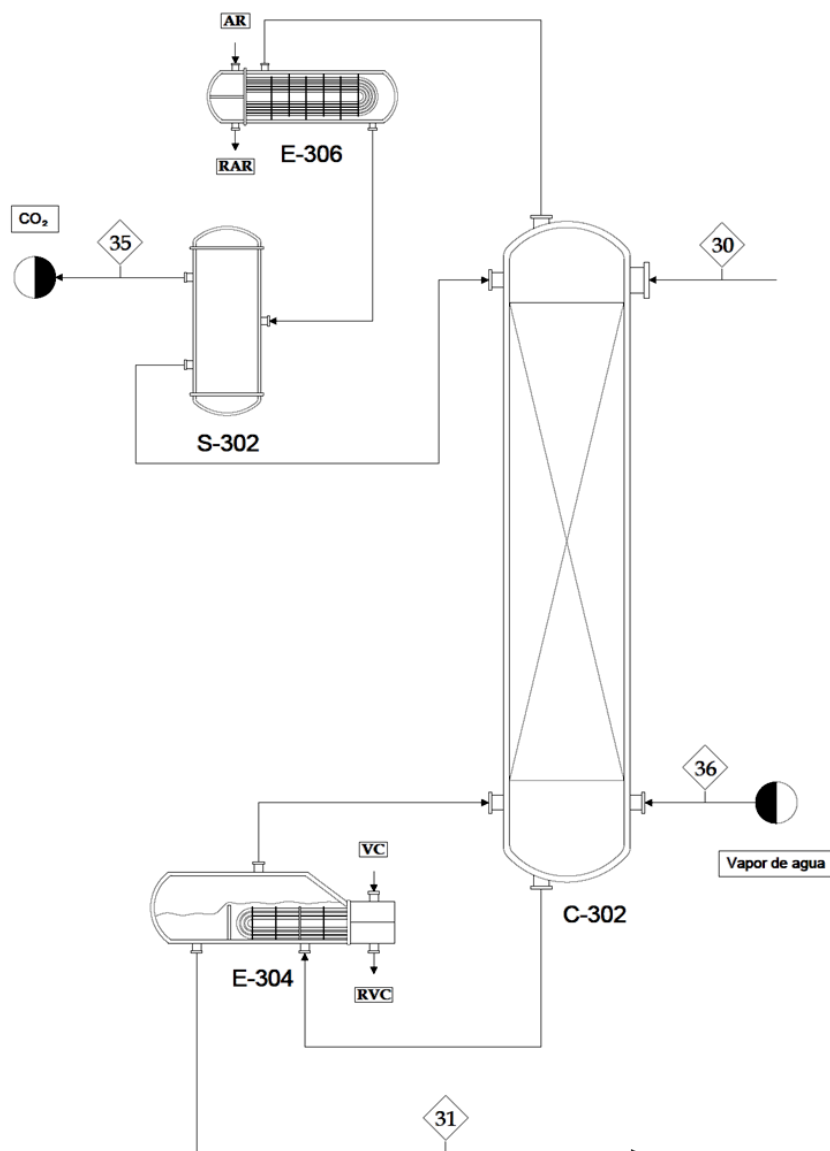


Figura II.17. Esquema del desorbedor C-302 y corrientes 30, 31, 35 y 36

4.4.1 Condensador E-306 de la columna C-302

Se trata de un condensador parcial que devuelve la mayor parte del vapor a la columna en estado líquido. Según lo descrito en el Anexo I: Balances de materia, el contenido de agua en la corriente de vapor que sale por la parte superior de la columna es del 25% molar y el resto se corresponde los gases obtenidos como producto de cabezas. Los gases no condensables están formados por el CO_2 desorbido y una pequeña cantidad de agua.

La temperatura de la parte superior de la columna es la misma que la de la corriente 30, la cual, en base a la bibliográfica presenta un valor de 103 °C. En cambio, el CO_2 se recupera a una temperatura de 32 °C en la corriente 35. [5]

En consecuencia, la energía retirada en el condensador debe ser igual a la necesaria para condensar casi todo el vapor de agua que llega y para enfriarla junto con los no condensables hasta 32 °C. El vapor que condensa es el vapor que alcanza la parte superior menos el que se pierde junto a los no condensables.

La cantidad de CO₂ desorbido es la que contiene la corriente 35, cuyo valor es de 452,369 kmol/h. En consecuencia, la cantidad de vapor de agua que sale por cabezas es:

$$F_{vapor} = 150,790 \text{ kmol/h}$$

El calor latente del agua saturada a 103 °C es 2249,0 kJ/kg o 40481,0 kJ/kmol [9]. En la Tabla II.21 se recoge la composición y el calor latente de la corriente de proceso del condensador.

Tabla II.21. Composición de la corriente de proceso del condensador y calor específico medio entre 32 y 103 °C para cada especie. Fuente de calores específicos: [7]

Corriente de proceso del condensador		
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-
N ₂	0,000	-
CO	0,000	-
CO ₂	452,369	39,227
CH ₄	0,000	-
C ₂ +	0,000	-
H ₂ O	150,790	75,388
MEA	0,000	-
H ₂ S	0,000	-

A partir de estos datos y de la ecuación 1.13, el calor retirado es:

$$Q = -8,171 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}$$

4.4.2 *Reboiler* E-304 de la columna C-302

Para determinar el calor aportado en el *reboiler* de la columna se realiza un balance de energía a la columna teniendo en cuenta todas las corrientes de entrada y de salida del

desorbedor. Para ello, se emplea la ecuación 2.2 anteriormente citada para las corrientes de entrada y de salida de esta columna, transformándose en:

$$F_{30} \cdot H_{30} + F_{36} \cdot H_{36} + Q_r = F_{31} \cdot H_{31} + F_{35} \cdot H_{35} + Q_c \quad (4.1)$$

La temperatura de salida del *reboiler* E-304 es de 116,6 °C, temperatura a la cual la fracción de vapor de la disolución de MEA 2,5M alcanza un valor de 0,5. La corriente de vapor que se introduce por la parte inferior del desorbedor C-302 (corriente 36) se encuentra también a esta misma temperatura. [5]

En las Tablas II.22 y II.23 se recogen los calores específicos y composiciones de las corrientes que intervienen en el absorbedor C-302.

Tabla II.22. Datos de las corrientes 30 y 31. Fuente de calores específicos: [7]

	30		31	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-	0,000	-
N ₂	0,000	-	0,000	-
CO	0,000	-	0,000	-
CO ₂	502,632	41,325	50,263	41,416
CH ₄	0,000	-	0,000	-
C ₂ +	0,000	-	0,000	-
H ₂ O	35667,050		35667,050	
+MEA	+1705,543	102,349	+1705,543	112,584
H ₂ S	0,000	-	0,000	-
T (°C)		103		116,6

Tabla II.23. Datos de las corrientes 35 y 36. Fuente de calores específicos: [7]

	35		36	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-	0,000	-
N ₂	0,000	-	0,000	-
CO	0,000	-	0,000	-
CO ₂	452,369	37,129	0,000	-
CH ₄	0,000	-	0,000	-
C ₂₊	0,000	-	0,000	-
H ₂ O	0,045	33,590	0,045	34,262
MEA	0,000	-	0,000	-
H ₂ S	0,000	-	0,000	-
T (°C)	32		116,6	

A partir de la información de las Tablas II.22 y II.23 y de la ecuación 2.3, la energía asociada a cada corriente es:

$$F_{30} \cdot H_{30} = -3,961 \cdot 10^8 \text{ kJ/h}$$

$$F_{31} \cdot H_{31} = -4,908 \cdot 10^8 \text{ kJ/h}$$

$$F_{35} \cdot H_{35} = -5,375 \cdot 10^5 \text{ kJ/h}$$

$$F_{36} \cdot H_{36} = -1,798 \cdot 10^2 \text{ kJ/h}$$

El calor necesario en el *reboiler* se determina a partir de la ecuación 4.1 proporcionando el siguiente valor:

$$Q = 1,034 \cdot 10^8 \text{ kJ/h}$$

4.5 Calentamiento y despresurización de la corriente rica en CO₂ del absorbedor C-301: Corrientes 28, 29 y 30

La corriente líquida rica en los gases absorbidos procedente del absorbedor C-201 (corriente 28) se calienta y despresuriza para poder desorber dicho gases. Para ello, se utiliza el intercambiador de calor E-303 A/B, el cual utiliza el calor procedente de la salida líquida pobre en CO₂ del desorbedor C-302 (corriente 32). A continuación, se despresuriza de forma adiabática en la válvula V-301.

En la Figura II.18 se muestra la representación esquemática del sistema.

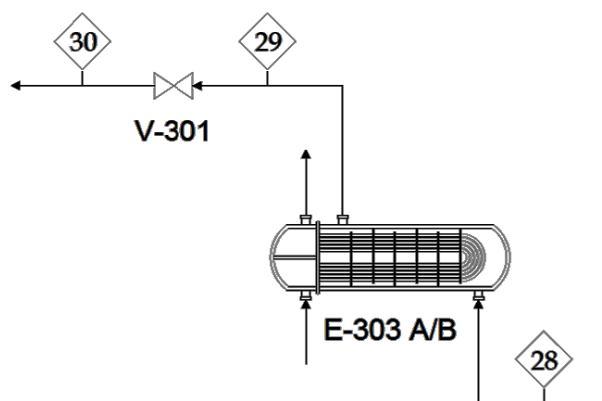


Figura II.18. Esquema del intercambiador E-303, válvula V-301 y corrientes 28, 29 y 30

Para poder determinar el poder de calentamiento del intercambiador es necesario saber previamente la diferencia de temperatura requerida. La temperatura de llegada a la columna de desorción debe ser de 103 °C con lo que, en primer lugar, se debe realizar el balance de energía a la válvula. De la misma forma que para el caso de la columna C-101, se asume que al ser un líquido su temperatura no varía al pasar por la válvula, con lo que la temperatura de la corriente 29 es igual a la de 30.

En la Tabla II.24 se recogen las composiciones y calores específicos de las corrientes de entrada y salida del intercambiador E-303.

Tabla 24. Datos de las corrientes 28 y 29. Fuente de calores específicos: [7]

	28		29	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-	0,000	-
N ₂	0,000	-	0,000	-
CO	0,000	-	0,000	-
CO ₂	502,632	37,221	502,632	41,325
CH ₄	0,000	-	0,000	-
C ₂ +	0,000	-	0,000	-
H ₂ O	35667,050		35667,050	
+MEA	+1705,543	100,891	+1705,543	102,349
H ₂ S	0,000	-	0,000	-
T (°C)	43,44		103	

A partir de los datos aportados en la Tabla II.24, se determina el valor del calor aportado con la ecuación 1.13:

$$Q = 2,274 \cdot 10^8 \text{ kJ/h}$$

4.6 Compresión y enfriamiento de la corriente pobre del desorbedor C-302: Corrientes 31, 32, 33 y 34

La corriente líquida pobre en CO₂ procedente del desorbedor C-302 (corriente 31) se presuriza y enfría para ser alimentada en la columna de absorción C-301. Para ello, se utiliza la bomba P-301 A/B y el intercambiador de calor E-303 A/B donde, como se comentó con anterioridad, intercambia calor con la corriente rica procedente de C-301.

En la Figura II.19 se representa este sistema y las corrientes asociadas a ellos.

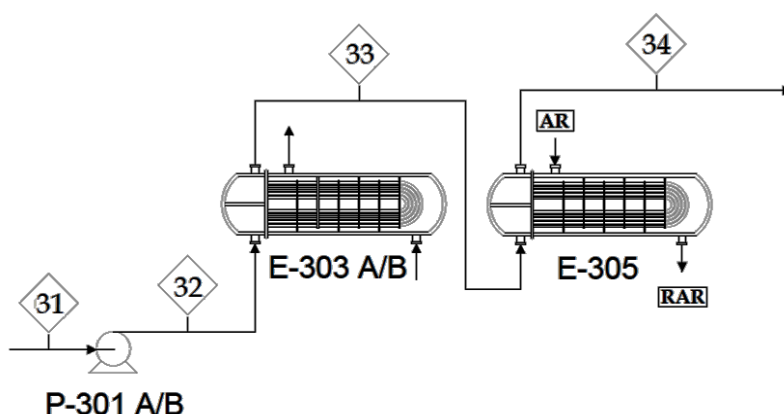


Figura II.19. Esquema de la bomba P-301 A/B, intercambiadores E-303 A/B y E-305 y corrientes 31, 32, 33 y 34

El cálculo de la energía requerida en la bomba se realiza con el simulador de procesos Aspen HYSYS. Se asume que por ser un líquido a comprimir, no existe variación de su temperatura apreciable. La energía necesaria para comprimir el caudal de la corriente 31 (37422,857 kmol/h) de 1,6 a 2,0265 MPa es:

$$P = 425,8 \text{ kW}$$

Asumiendo una eficiencia adiabática del 75%, la potencia consumida por la bomba es:

$$P' = 567,8 \text{ kW}$$

Por otro lado, el calor intercambiado en E-303 A/B es menor al requerido por la corriente 31. Por ello, es necesario utilizar un segundo equipo de enfriamiento para alcanzar la temperatura objetivo, el intercambiador E-305.

Los datos de las corrientes pertinentes se recogen en la Tabla II.25.

Tabla II.25. Datos de las corrientes 32, 33 y 34. Fuente de calores específicos: [7]

	32		33		34	
	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)	kmol/h	Cp (kJ/kmol°C)
H ₂	0,000	-	0,000	-	0,000	-
N ₂	0,000	-	0,000	-	0,000	-
CO	0,000	-	0,000	-	0,000	-
CO ₂	50,263	41,416	50,263	37,232	50,263	37,129
CH ₄	0,000	-	0,000	-	0,000	-
C ₂ +	0,000	-	0,000	-	0,000	-
H ₂ O	35667,050		35667,050		35667,050	
+MEA	+1705,543	112,584	+1705,543	100,902	+1705,543	95,185
H ₂ S	0,000	-	0,000	34,324	0,000	-
T (°C)	116,6		59,62		30	

Aplicando la ecuación 1.10 al primer intercambiador se puede calcular la temperatura de salida del mismo (corriente 33), obteniéndose el siguiente valor:

$$T_{33} = 59,62 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

El calor necesario en el intercambiador E-305 será aquel que sea capaz de enfriar la corriente 33 hasta la temperatura de cabezas del absorbedor C-301. En consecuencia, a partir de la ecuación 1.13 se llega al siguiente resultado:

$$Q = -1,086 \cdot 10^8 \text{ kJ/h}$$

4.7 Purificación del hidrógeno producido en el PSA y recirculación: Corrientes 37, 38, 39, 40 y 41

Se considera que el sistema de purificación PSA trabaja a una temperatura constante. Por ello, no se considera realizar el balance de energía a esta unidad.

En la Figura II.20 se recoge una representación gráfica de este sistema.

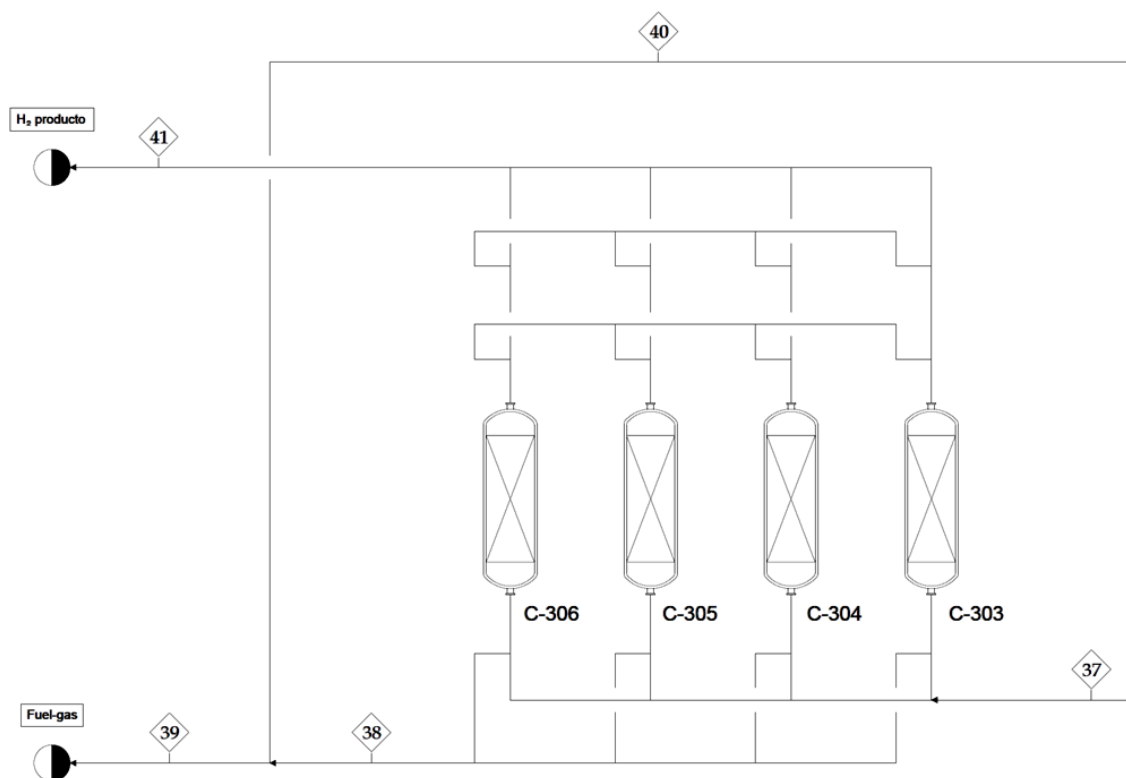


Figura II.20. Esquema sistema de purificación PSA y corrientes 37, 38, 39, 40 y 41

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] FELDER, R. M., ROUSSEAU R. W., *Principios elementales de los procesos químicos*, 3ª edición, México: Limusa Wiley, 2003. ISBN 968-18-6169-8
- [2] COSTA NOVELLA, E., *Ingeniería química*, Tomo I: Conceptos Generales, 1ª edición, España: Editorial Alhambra, 1983. ISBN 84-205-0990-6
- [3] VAIDYA, P. D., MAHAJANI, V. V. Quickly design CO₂ – amine absorber. *Indian Journal of Chemical Technology*, 2006, volumen 13, 47-52. ISSN 0971-457X
- [4] ALONSO, T. V. *Energy and performance optimization for H₂S removal from sour gases in refinery units* [sitio web]. The Dow Chemical Company, [consultado el 15 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://oilandgas.dow.com/rio/en/removal.htm>
- [5] SANCHEZ ALARCÓN, J. A., PUJOL, R. O., ESTRANY CODA, F. Planta para la recuperación del dióxido de carbono de los gases de combustión. *Técnica Industrial*, 2006, volumen 261, 35-41. ISSN 0040-1838
- [6] MORERO, B., CROUER-MARTINIS, M. C., GROPELLI, E., CAMPANELLA, E. A. Comparación de diferentes soluciones de aminas para la purificación de biogás. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2011, volumen 15, 97-103. ISSN 0329-5184
- [7] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, *NIST-JANAF Thermochemical Tables* [sitio web], [consultado del 15 al 26 de abril de 2016]. Disponible en: <http://kinetics.nist.gov/janaf/>
- [8] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, *Búsqueda de datos de especies por Fórmula Química* [sitio web], [consultado del 15 al 26 de abril de 2016]. Disponible en: <http://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser.html>
- [9] SMITH, J. M., VAN NESS, H. C., ABBOTT, M. M., *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*, 5ª edición, México: Mc Graw Hill, 1997. ISBN 970-10-1333-6
- [10] LUDWIG, E. E., *Applied process design*. Volumen 3. 3ª edición, EE. UU.: Gulf Professional Publishing, 2001. ISBN 0-8841-5651-6
- [11] DRESSER-RAND. *Centrifugal Compressor Performance Use for estimating the D-R DATUM compressor for your process*. [sitio web], [consultado del 20 al 23 de abril de 2016]. Disponible en: <http://cirs.dresser-rand.com/TurboCalc/GasAnalysis.asp>

Anexo III.

Cálculos justificativos

Planta de Producción de Hidrógeno por

Reformado de Gas Natural

INDICE ANEXO III

REFORMADOR R-201	3
COLUMNA DE ABSORCIÓN CON REACCIÓN QUÍMICA C-301	57
CONDUCCIONES	112

Parte A. Reactor R-201

Planta de Producción de Hidrógeno por

Reformado de Gas Natural

INDICE PARTE A

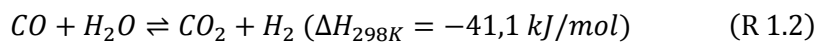
1. INTRODUCCIÓN	6
2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	7
2.1 Balance de materia.....	7
2.2 Cinética y cálculo de la masa del catalizador	9
2.2.1 Mecanismo de reacción	9
2.2.2 Cinética de reacción.....	12
2.2.3 Limitaciones difusionales	15
2.2.4 Características del catalizador.....	16
2.2.5 Cálculo del peso del catalizador	19
2.3 Balance de energía.....	23
2.4 Caída de presión	24
2.5 Diseño mecánico del reactor.....	25
2.5.1 Tubos	25
2.5.2 Paredes de la zona de combustión y estructura.....	29
3. REFORMADOR R-301	32
3.1 Introducción.....	32
3.2 Balance de materia.....	33
3.3 Proceso de integración cinética y cálculo del peso del catalizador	34
3.4 Balance de energía.....	46
3.5 Dimensionamiento del reactor y diseño mecánico	48
3.5.1 Cálculo del número de tubos	48
3.5.2 Selección del material de los tubos.....	49
3.5.3 Cálculo del espesor de los tubos	49
3.5.4 Dimensionamiento de la zona de combustión	51
3.1 Caída de presión	52

4. BIBLIOGRAFÍA	54
-----------------------	----

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente diseño es caracterizar y diseñar la etapa de reacción principal, haciendo especial hincapié en el dimensionamiento del mismo a partir de datos cinéticos. Por ello, dicho diseño se centrará en el cálculo del tiempo de residencia y la masa del catalizador necesario, entre otros.

Principalmente, el proceso de reformado de metano se puede describir según las siguientes reacciones reversibles en fase gas: [1]



Donde la reacción R 1.1 es denominada como reacción de reformado de metano y la reacción R 1.2 se corresponde a la reacción *water gas shift*. [1]

Las constantes de equilibrio de las reacciones anteriores se pueden expresar como función de la temperatura de la siguiente manera: [1]

$$k_{eq1} = 10266,76 \cdot \exp\left(-\frac{26830}{T} + 30,114\right) [kPa^2] \quad (1.1)$$

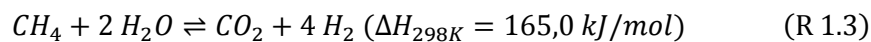
$$k_{eq2} = \exp\left(\frac{4400}{T} - 4,063\right) [-] \quad (1.2)$$

Donde:

k_{eqj} : constante de equilibrio para cada reacción

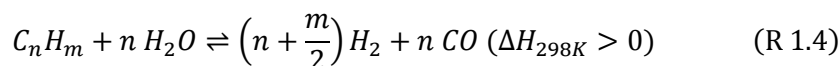
T: temperatura (K)

Además de ello, se puede presentar la suma de R 1.1 y R 1.2, reacción llamada como reformado total de metano (*overall steam reforming*): [1]



La constante de equilibrio de la reacción R 1.3 es el producto de las constantes correspondientes a las dos primeras reacciones. [1]

De forma similar, el reformado de hidrocarburos de mayor peso molecular presentes en el gas natural o en GLPs se representa de la siguiente manera: [2]



Las reacciones R 1.1, R 1.3 y R 1.4 se corresponden a reacciones endotérmicas que necesitan aporte de calor, con lo cual, se favorecen tanto termodinámicamente como cinéticamente con el aumento de la temperatura. En cambio, la reacción R 1.2 es exotérmica y se verá comprometida desde el punto de vista de la termodinámica con el aumento de la temperatura. [3]

Para maximizar la eficiencia de la conversión de CO en CO₂ y de producción de H₂ es necesario trabajar a temperaturas y presiones elevadas. Teniendo en cuenta los coeficientes estequiométricos de las reacciones que tienen lugar, los requerimientos de vapor por átomo de carbono presentan una relación 1 a 1. Debido a que se ha demostrado que bajo estas condiciones se favorece la formación de coque sobre el catalizador, se opta por operar a relaciones de vapor mayores (en torno a 3), las cuales permiten reducir la deposición del residuo carbonoso. [3]

Todas las reacciones son de equilibrio y, en consecuencia, reversibles en función de la temperatura y de la presión parcial de las especies que intervienen. Por un lado, la reacción R 1.2 es lo suficientemente rápida como para poder asumir que alcanza el equilibrio en la mayor parte del reformador y la reacción R 1.4 ocurre en total extensión debido a la poca cantidad de hidrocarburos presentes. En cambio, la reacción R 1.1 no es capaz de alcanzarlo a la temperatura de salida del reactor y, por ello, se define la temperatura a la que lo alcanza como: [2]

$$\Delta T_R = T_{salida} - T(Q_R) \quad (1.3)$$

Donde ΔT_R es la diferencia entre la temperatura de salida del reactor (T_{salida}) y la temperatura a la que la reacción R 1.1 alcanza el equilibrio, cuya constante será igual al cociente entre productos y reactivos elevados a sus coeficientes estequiométricos (Q_R). [2]

2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

2.1 Balance de materia

Para determinar los moles de salida de cada una de las especies, es necesario realizar el balance de materia a esta unidad mediante el cálculo de las conversiones de las reacciones que intervienen. [2]

Definiendo el consumo de moles de cada reacción:

- F: kmoles/h de CH₄ consumido
- G: kmoles/h de CO₂ producido
- H: kmoles/h de C₂H₆ consumido

Se pueden expresar en función de las conversiones como: [2]

$$F = \alpha_{CH_4} \cdot F_{CH_4}^0 \quad (2.1)$$

$$G = \alpha_{CO} \cdot F_{CO} = \alpha_{CO_2} \cdot (F + 2 \cdot H) \quad (2.2)$$

$$H = \alpha_{C_2H_6} \cdot F_{C_2H_6}^0 \quad (2.3)$$

Donde:

α_{CH_4} : conversión de CH₄ en CO

$\alpha_{C_2H_6}$: conversión de C₂H₆ en CO

α_{CO} : conversión de CO producido en CO₂

F_i^0 : flujo de entrada de CH₄ y C₂H₆ (kmol/h)

F_i : flujo producido de CO (kmol/h)

En consecuencia, se puede definir el balance de materia al reactor como se muestra en la Tabla A.1.

Tabla A.1. Formulación del balance de materia del reformador. Adaptado de: [2]

Componente i	Entrada (F_i^0) kmol/h	Consumo kmol/h	Generación kmol/h	Salida (F_i) kmol/h
H ₂	$F_{H_2}^0$	-	$3 \cdot F + G + 5 \cdot H$	$F_{H_2}^0 + 3 \cdot F + G + 5 \cdot H$
N ₂	$F_{N_2}^0$	-	-	$F_{N_2}^0$
CO	F_{CO}^0	G	$F + 2 \cdot H$	$F_{CO}^0 - G + F + 2 \cdot H$
CO ₂	$F_{CO_2}^0$	-	G	$F_{CO_2}^0 + G$
CH ₄	$F_{CH_4}^0$	F	-	$F_{CH_4}^0 - F$
C ₂ H ₆	$F_{C_2H_6}^0$	H	-	$F_{C_2H_6}^0 - H$
H ₂ O	$F_{H_2O}^0$	$G + F + 2 \cdot H$	-	$F_{H_2O}^0 - G - F - 2 \cdot H$

Las constantes de equilibrio se definen como el cociente de las presiones parciales de productos y reactivos, elevados a sus coeficientes estequiométricos, de la siguiente manera: [2]

$$k_{eq1} = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}^3}{P_{H_2O} \cdot P_{CH_4}} \quad (2.4)$$

$$k_{eq2} = \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}} \quad (2.5)$$

Donde k_{eqj} es la constante de equilibrio para las reacciones R 1.1 y R 1.2 y P_i las presiones parciales de cada especie a la salida.

El procedimiento de cálculo consiste en determinar las constantes de equilibrio de dichas reacciones en las condiciones adecuadas y, a partir éstas, obtener el valor de las conversiones y la cantidad de cada especie en la salida del reformador. [2]

2.2 Cinética y cálculo de la masa del catalizador

2.2.1 Mecanismo de reacción

Debido a la complejidad del reformado de metano por tratarse de un sistema catalítico heterogéneo, es muy difícil definir el mecanismo de reacción para determinar la cinética del proceso con exactitud. Existen multitud de posibles reacciones y, en consecuencia, esquemas de reacción. En la Tabla A.2 se muestran todas las reacciones que se podrían producir. En 1989, los autores Xu y Froment estudiaron cuál podría ser el esquema de reacción y cinética de este proceso usando un catalizador de níquel, proponiendo un modelo que se adapta de forma satisfactoria y que, por ello, es de los más usados hasta ahora. [4]

Tabla A.2. Reacciones posibles en el proceso de reformado de metano. Fuente: [4]

Número	Reacción	$-\Delta H_{298}$, kJ/mol
I	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	-206,1
II	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	41,15
III	$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$	-165,0
IV	$CH_4 + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 2H_2$	-247,3
V	$CH_4 + 3CO_2 \leftrightarrow 4CO + 2H_2O$	-330,0
VI	$CH_4 \leftrightarrow C + 2H_2$	-74,82
VII	$2CO \leftrightarrow C + CO_2$	173,3
VIII	$CO + H_2 \leftrightarrow C + H_2O$	131,3
IX	$CO_2 + 2H_2 \leftrightarrow C + 2H_2O$	90,13
X	$CH_4 + 2CO \leftrightarrow 3C + 2H_2O$	187,6
XI	$CH_4 + CO_2 \leftrightarrow 2C + 2H_2O$	15,3

Para poder deducir las expresiones cinéticas de las etapas controlantes del proceso, se debe definir cuál es el esquema de reacción. En función de las observaciones e información proporcionada por otros autores, Xu y Froment llegaron a las siguientes suposiciones: [4]

- El vapor de agua reacciona con los átomos superficiales de níquel, produciendo H_2 gas y oxígeno adsorbido.
- El metano se adsorbe en la superficie de níquel y reacciona con el oxígeno adsorbido o se disocia para formar radicales unidos mediante quimisorción en forma de CH_3-L , CH_2-L , $CH-L$ y $C-L$.
- La concentración de radicales con carbono (CH_3-L , CH_2-L , $CH-L$ y $C-L$) es mucho menor que la concentración de centros activos.
- El oxígeno adsorbido y los radicales con carbono reaccionan para formar $L-CH_2O$, $L-CHO$ o $L-CO$, $L-CO_2$.
- El hidrógeno formado se libera a fase gas directamente y/o el hidrógeno gaseoso está en equilibrio con $H-L$ o H_2-L .
- Se cree que todos los esquemas de reacción que contienen las etapas I, II y III presentan una velocidad de reacción mucho menor con lo que controlarán la velocidad global de reacción.

A partir de ello, Xu y Froment discutieron dos esquemas posibles de reacción, los cuales se corresponden a las Figuras A.1 y A.2. [4]

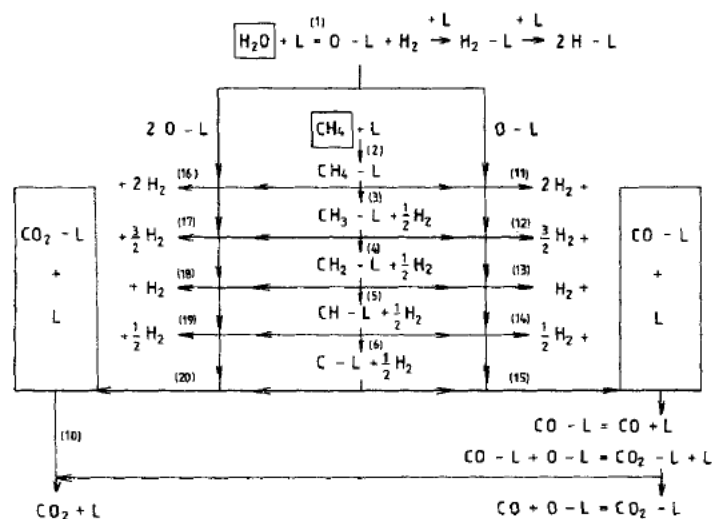


Figura A.1. Esquema de reacción 1. Fuente: [4]

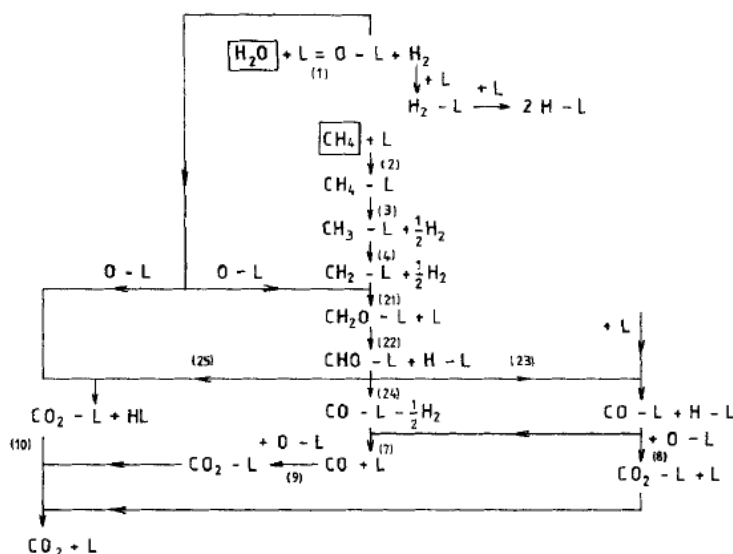


Figura A.2. Esquema de reacción 2. Fuente: [4]

El primer esquema contempla la formación paralela de CO y CO₂ a partir del CH₄ adsorbido y de los radicales derivados de él. El segundo esquema incluye los mecanismos que tienen en cuenta la formación paralela de CO, CO₂ y CHO-L. [4]

Descartaron el análisis termodinámico de aquellos esquemas de reacción en los que se genere todo el CO₂ a partir de CO y aquellos en los que se formen directamente el CO y CO₂ del metano. Por lo tanto, en función de las etapas determinantes de la velocidad de reacción, se pueden generar 21 conjuntos de ecuaciones de velocidad a partir de los esquemas anteriores. [4]

Las velocidades de reacción fueron obtenidas de la misma manera que para una única reacción. Se definieron a partir de las etapas controlantes de las tres reacciones globales, I, II y III, en función de las concentraciones adsorbidas. Después, se eliminaron estas concentraciones por medio de las relaciones de equilibrio de Langmuir y el equilibrio entre los sitios activos incluyendo a los vacantes y a los ocupados por las especies adsorbidas. Esto transformó las ecuaciones en otras en función de las presiones parciales en la fase gaseosa accesible, las cuales presentaban un denominador que refleja la adsorción de las especies presentes. Debido a que se supone que las tres reacciones tienen lugar en los mismos sitios activos, el denominador es idéntico para todas ellas. [4]

A partir del esquema 2 y datos experimentales, Xu y Froment propusieron que las etapas de reacción son las mostradas en las Figura A.3 y en la Tabla A.3. [4]

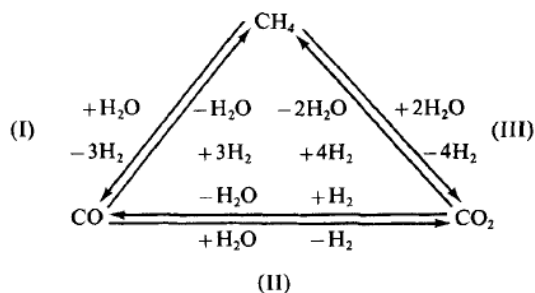


Figura A.3. Esquema de reacción del reformado de metano. Fuente: [4]

Donde se reflejan las reacciones I, II y III de la Tabla A.2, que su vez son las reacciones R 1.1, R 1.2 y R 1.3 definidas en el Apartado 1: Introducción del presente diseño.

Tabla A.3. Etapas del esquema de reacción 2 de la Figura 2. Fuente: [4]

Etapas
$\text{H}_2\text{O-L} \leftrightarrow \text{O-L} + \text{H}_2$
$\text{CH}_4 + \text{L} \leftrightarrow \text{CH}_4\text{-L}$
$\text{CH}_4\text{-L} + \text{L} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{-L} + \text{H-L}$
$\text{CH}_3\text{-L} + \text{L} \leftrightarrow \text{CH}_2\text{-L} + \text{H-L}$
$\text{CH}_2\text{-L} + \text{O-L} \leftrightarrow \text{CH}_2\text{O-L} + \text{L}$
$\text{CH}_2\text{O-L} + \text{L} \leftrightarrow \text{CHO-L} + \text{H-L}$
$\text{CHO-L} \leftrightarrow \text{CO-L} + \text{H-L}$
$\text{CO-L} + \text{O-L} \leftrightarrow \text{CO}_2\text{-L} + \text{L}$
$\text{CHO-L} + \text{O-L} \leftrightarrow \text{CO}_2\text{-L}$
$\text{CO-L} \leftrightarrow \text{CO} + \text{L}$
$\text{CO}_2\text{-L} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{L}$
$2\text{H-L} \leftrightarrow \text{H}_2\text{-L} + \text{L}$
$\text{H}_2\text{-L} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{L}$

2.2.2 Cinética de reacción

Para dimensionar el reactor a partir del cálculo del catalizador necesario se debe recurrir a las expresiones cinéticas aportadas por la bibliografía. Las velocidades de reacción para el proceso de metanación formuladas por Xu y Froment son de acuerdo a modelos cinéticos del tipo Langmuir-Hinshelwood. [4]

Las velocidades de reacción para las reacciones R 1.1, R 1.2 y R 1.3 son: [1]

$$r_1 = \frac{k_1}{P_{H_2}^{2,5}} \cdot \frac{\left(P_{CH_4} \cdot P_{H_2O} - \frac{P_{H_2}^3 \cdot P_{CO}}{k_{eq1}} \right)}{DEN^2} \quad (2.6)$$

$$r_2 = \frac{k_2}{P_{H_2}} \cdot \frac{\left(P_{CO} \cdot P_{H_2O} - \frac{P_{H_2} \cdot P_{CO_2}}{k_{eq2}} \right)}{DEN^2} \quad (2.7)$$

$$r_3 = \frac{k_3}{P_{H_2}^{3,5}} \cdot \frac{\left(P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}^2 - \frac{P_{H_2}^4 \cdot P_{CO_2}}{k_{eq3}} \right)}{DEN^2} \quad (2.8)$$

$$DEN = 1 + K_{CO} \cdot P_{CO} + K_{H_2} \cdot P_{H_2} + K_{CH_4} \cdot P_{CH_4} + \frac{K_{H_2O} \cdot P_{H_2O}}{P_{H_2}} \quad (2.9)$$

Donde:

r_j : velocidad de cada reacción

P_i : presión parcial de cada especie

k_j : constante de velocidad de cada reacción

k_{eqj} : constante de equilibrio de cada reacción

K_i : constante de adsorción de cada especie

A partir de estas expresiones cinéticas, se puede deducir las velocidades de aparición o desaparición de CO, CO₂ y CH₄ como: [4]

$$r_{CH_4} = r_1 + r_3 \quad (2.10)$$

$$r_{CO_2} = r_2 + r_3 \quad (2.11)$$

$$r_{CO} = r_1 - r_3 \quad (2.12)$$

Debido a que solo dos de estas tres velocidades son independientes, se pueden simplificar definiendo solamente la velocidad de desaparición de CH₄ y de formación de CO₂: [4]

$$r_{CH_4} = r_1 + r_3 \quad (2.13)$$

$$r_{CO_2} = r_2 + r_3 \quad (2.14)$$

En consecuencia, la velocidad de variación de cantidad de sustancia para el CH₄ y el CO₂ es: [1]

$$\frac{F_{CH_4}^0 \cdot d\alpha_{CH_4}}{dW} = r_{CH_4} \quad (2.15)$$

$$\frac{F_{CH_4}^0 \cdot d\alpha_{CO_2}}{dW} = r_{CO_2} \quad (2.16)$$

Donde W es el peso del catalizador, F_i^0 el flujo molar de entrada de metano y además se definen unas nuevas conversiones: la conversión total de CH₄ (α_{CH_4}) y la conversión de CH₄ en CO₂ (α_{CO_2}).

Las presiones parciales de cada componente pueden ser calculadas como: [5]

$$P_{CH_4} = \frac{F_{CH_4}^0 \cdot (1 - \alpha_{CH_4})}{F_{CH_4}^0 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha_{CH_4}) + F_{H_2O}^0 + F_{CO}^0 + F_{H_2}^0 + F_{N_2}^0 + F_{CO_2}^0 + F_{C_2H_6}^0} \cdot P_t \quad (2.17)$$

$$P_{H_2O} = \frac{F_{H_2O}^0 - F_{CH_4}^0 (\alpha_{CH_4} + \alpha_{CO_2})}{F_{CH_4}^0 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha_{CH_4}) + F_{H_2O}^0 + F_{CO}^0 + F_{H_2}^0 + F_{N_2}^0 + F_{CO_2}^0 + F_{C_2H_6}^0} \cdot P_t \quad (2.18)$$

$$P_{H_2} = \frac{F_{H_2}^0 + F_{CH_4}^0 (3 \cdot \alpha_{CH_4} + \alpha_{CO_2})}{F_{CH_4}^0 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha_{CH_4}) + F_{H_2O}^0 + F_{CO}^0 + F_{H_2}^0 + F_{N_2}^0 + F_{CO_2}^0 + F_{C_2H_6}^0} \cdot P_t \quad (2.19)$$

$$P_{CO_2} = \frac{F_{CH_4}^0 \cdot \alpha_{CO_2}}{F_{CH_4}^0 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha_{CH_4}) + F_{H_2O}^0 + F_{CO}^0 + F_{H_2}^0 + F_{N_2}^0 + F_{CO_2}^0 + F_{C_2H_6}^0} \cdot P_t \quad (2.20)$$

$$P_{CO} = \frac{F_{CH_4}^0 \cdot (\alpha_{CH_4} - \alpha_{CO_2})}{F_{CH_4}^0 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha_{CH_4}) + F_{H_2O}^0 + F_{CO}^0 + F_{H_2}^0 + F_{N_2}^0 + F_{CO_2}^0 + F_{C_2H_6}^0} \cdot P_t \quad (2.21)$$

Donde P_t es la presión total.

La dependencia de las constantes de velocidad de reacción y de las de adsorción con la temperatura se puede modelizar como ecuaciones de Arrhenius, las cuales presentan la siguiente forma: [5]

$$k_j = k_j^0 \cdot \exp\left(-\frac{E_j}{R \cdot T}\right) \quad (2.22)$$

$$k_{eqj} = k_{eqj}^0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H_i}{R \cdot T}\right) \quad (2.23)$$

Donde E_j es la energía de activación para cada reacción y ΔH_i la entalpía de adsorción de cada especie.

A continuación se muestra la Tabla A.4 con los parámetros característicos de las constantes de velocidad y de adsorción en función de la temperatura.

Tabla A.4. Parámetros de las constantes de velocidad de reacción y de adsorción. Fuente: [1]

Constante	Factor preexponencial	Energía de activación o entalpía de adsorción (kJ/mol)
k_1 (mol kPa ^{0.5} / kg s)	$9,49 \cdot 10^{16}$	240,1
k_2 (mol / kg s kPa)	$4,39 \cdot 10^4$	67,13
k_3 (mol kPa ^{0.5} / kg s)	$2,29 \cdot 10^{16}$	243,9
K_{CH_4} (kPa ⁻¹)	$6,65 \cdot 10^{-2}$	-38,28
K_{H_2O} (-)	$1,77 \cdot 10^5$	88,68
K_{CO} (kPa ⁻¹)	$8,23 \cdot 10^{-7}$	-70,65
K_{H_2} (kPa ⁻¹)	$6,12 \cdot 10^{-11}$	-82,9

2.2.3 Limitaciones difusionales

Los datos cinéticos anteriormente proporcionados no tienen en cuenta ninguna limitación difusional. En los reformadores comerciales, los cuales utilizan partículas de catalizador de tamaño relativamente alto, existen limitaciones en la velocidad de reacción debidas a la dificultad de las especies a difundirse a través de los poros del catalizador. En consecuencia, las velocidades de reacción se modifican a las siguientes: [1]

$$r_{CH_4} = \eta_1 \cdot r_1 + \eta_3 \cdot r_3 \quad (2.24)$$

$$r_{CO_2} = \eta_2 \cdot r_2 + \eta_3 \cdot r_3 \quad (2.25)$$

Donde η_i es el factor de eficacia de cada reacción debido a limitaciones difusionales.

Este valor puede ser relacionado con el diámetro de partícula del catalizador y con el factor de tortuosidad, el cual depende a su vez de la geometría y del tamaño de los poros. La actividad aparente aumenta a medida que el tamaño de partícula se reduce, pero ello conlleva a un aumento en la caída de presión. [3]

Según datos bibliográficos, los valores de η_i varían a lo largo del reactor, pudiendo alcanzar valores cercanos a un 30% en la entrada, pero que rápidamente bajan a valores próximos a un 1%. En la práctica, se trabaja con tamaños de partícula relativamente grandes y factores de eficacia bajos para evitar pérdidas por fricción elevadas. [3]

En la Figura A.4 se muestra una representación gráfica de la variación típica de los factores de eficacia para las reacciones que tienen lugar en el proceso de reformado de metano.

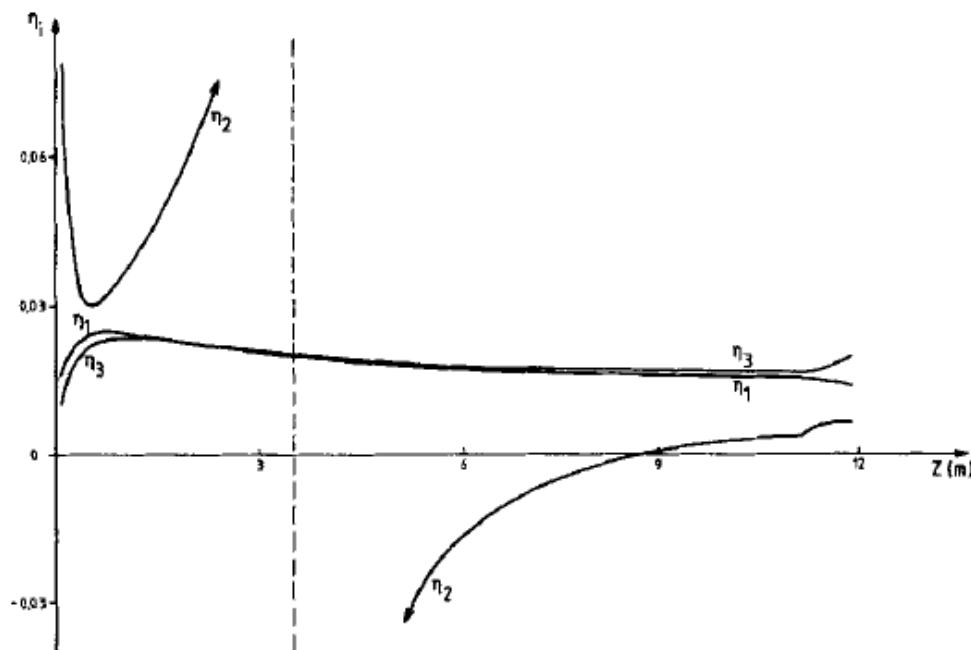


Figura A.4. Evolución del factor de eficacia en un reformador comercial. Fuente: [6]

Se puede destacar que mientras que los factores de las reacciones R 1.1 y R 1.3 presentan valores muy similares y que bajan muy lentamente a lo largo del reformador, el de la reacción R 1.2 presenta una discontinuidad. Esto se debe a que en ese punto la dirección de la reacción cambia de positivo a negativo debido a que alcanzó el equilibrio y las demás reacciones siguen reaccionando forzando a que ésta se invierta para mantenerlo. Cuando más próxima esté la reacción del equilibrio, la velocidad de reacción es mucho más sensible respecto a los cambios de concentración y en secuencia aumenta el valor de su factor de eficacia. [6]

Debido a la complejidad que presenta tener en cuenta la variación de los factores de eficacia en función de la conversión alcanzada, se considera un valor medio de 0,07 para las tres reacciones. [1]

2.2.4 Características del catalizador

Los catalizadores industriales utilizados se basan en níquel sobre un soporte inerte. Debido a las severas condiciones de operación solamente la α -alúmina, magnesia, espinela y circonio se pueden utilizar como soportes termoestables. Para mejorar su resistencia mecánica y a la temperatura se pueden añadir óxidos como CaO, SrO o TiO₂. [7]

Además de ello, se utilizan en diferentes formas y tamaños, destacando el uso de anillos *Raschig* de 16*16*6 mm o 16*10*8 mm, *seven- hole pellets* o *seven-spoked wheels* de 16*5 mm. [7]

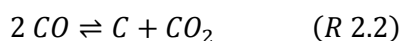
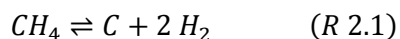
En la Figura A.5 se recogen diferentes tipos de catalizadores empleados en el reformado de gas natural.



Figura A.5. Catalizadores utilizados en el proceso de obtención de reformado de metano. Fuente: [8]

El proceso de fabricación de este catalizador consiste en la impregnación del soporte con una disolución acuosa de una sal de níquel, como por ejemplo un nitrato, seguido de un secado y una calcinación a 400°C. Cuanto mayor sea el contenido en níquel, la actividad por gramo de catalizador aumentará, pero la dispersión o utilización del metal y la resistencia son menores. Entonces, se debe buscar qué cantidad de níquel y qué superficie específica del soporte proporcionan el mejor equilibrio entre todas estas propiedades. [7]

Otros factores que afectan al rendimiento es la formación de coque y envenenamiento. El coque formado puede ser debido a la descomposición de CH_4 o a la dismutación o desproporción de CO (reacción de Boudouard). [7]



La reacción de Boudouard es aproximadamente entre 3 y 10 veces más rápida que la de descomposición de metano. En la práctica, la formación de carbón se reduce operando con relaciones molares de $\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$ elevadas de 2.5 a 3.0. [7]

Por otro lado, los catalizadores de níquel son muy sensibles a especies como azufre, arsénico y halógenos. Compuestos como H_2S o mercaptanos y sulfuros de bajo punto de ebullición presentes en el gas natural envenenan con mucha facilidad el catalizador, incluso en cantidades de 50-600 ppm. Normalmente, la cantidad de azufre que es capaz de tolerar no debe superar 5 ppm, dependiendo de las condiciones del reactor y del tipo de catalizador. Con dispersiones bajas de níquel, solamente se envenenará una pequeña parte del catalizador formando sulfuros. Al mismo tiempo, el catalizador parcialmente envenenado con azufre presenta una mayor resistencia a la formación de coque. Los átomos de níquel no envenenados (sin azufre) son lo suficientemente activos como para seguir catalizando la reacción, mientras que la pequeña cantidad de S presente es capaz de inhibir la formación de *whiskers* de carbono. [7]

El catalizador empleado en el diseño del reformador está compuesto por un 15,4% de níquel en peso sobre un lecho de alúmina en forma de anillos *Raschig* de dimensiones 16*16*8mm. A continuación se detallan sus características en la Tabla A.5.

Tabla A.5. Características principales del catalizador. Fuente: [9, 10]

Parámetro	Símbolo	Valor
Porosidad del lecho	$\varepsilon_c (\text{m}_{\text{gas}}^3/\text{m}_{\text{col}}^3)$	0,57
Porosidad de la partícula	$\varepsilon_p (\text{m}_{\text{gas}}^3/\text{m}_{\text{poro}}^3)$	0,649
Densidad de la partícula	$\rho_p (\text{kg}_{\text{cat}}/\text{m}_{\text{cat}}^3)$	1274
Densidad del sólido	$\rho_s (\text{kg}_{\text{cat}}/\text{m}_{\text{cat}}^3)$	3630
Radio del poro	$R_{\text{poro}} (\text{nm})$	4,25
Radio de la partícula	$R_p (\text{m})$	0,008
Ratio área/volumen	$a_c (\text{m}^{-1})$	2500

Donde la porosidad del lecho para anillos *Raschig* se puede determinar con la Figura A.6 a partir del diámetro de las partículas. [10]

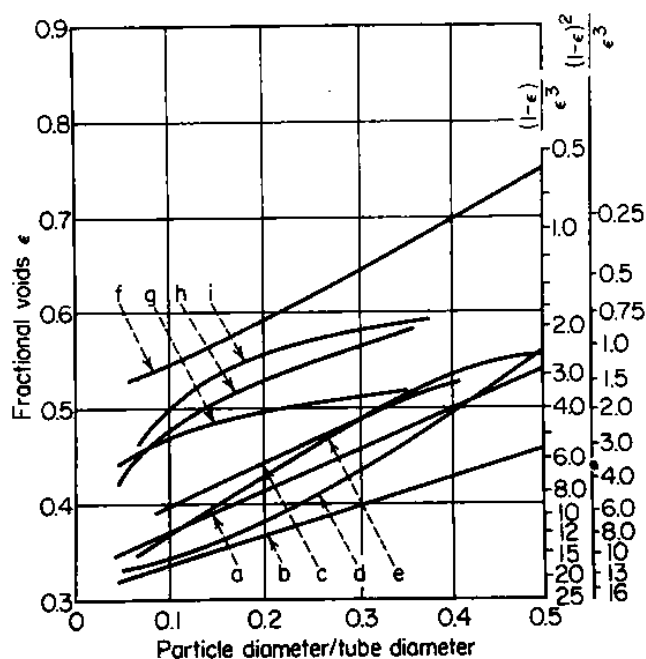


Figura A.6. Fracción hueca o porosidad para lechos empacados. Esferas: a) lisas, uniforme; b) lisas, mezcla; c) arcilla. Cilindros: d) lisos, uniforme; e) alundum, uniforme; f) anillos *Raschig*. Gránulos: g) magnetita fundida; h) alundum fundida; i) aloxite Fuente [10]

2.2.5 Cálculo del peso del catalizador

Para calcular el peso de catalizador necesario se procede a la integración simultánea de las ecuaciones de velocidad para las reacciones que tienen lugar. La ecuación de velocidad general para un reactor es: [11]

$$\frac{W}{F_A^0} = \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{-r_A} \quad (2.26)$$

Donde:

W: peso del catalizador en (kg_{cat})

F_A^0 : flujo del reactivo limitante (kmol/h)

X_A : conversión del reactivo limitante

$-r_A$: velocidad de reacción del reactivo limitante ($\text{kmol/kg}_{\text{cat}} \text{ h}$)

Para simplificar los cálculos, debido a la poca cantidad de etano presente en la alimentación, se considera que se consume completamente antes de que ocurran el resto de

reacciones. De esta manera, la entrada al reactor se corresponde a la salida producida de reaccionar solamente el etano, con su correspondiente producción de CO y de H₂.

Debido a que se trata de tres reacciones que tienen lugar simultáneamente, que consumen y/o producen especies que intervienen en las otras reacciones y además son de equilibrio, es necesario reflejar la influencia de cada reacción sobre las otras. Por ello, no se puede integrar cada expresión de velocidad por separado. A modo de simplificación, en vez de considerar las velocidades para las tres reacciones principales, se realiza la integración sobre la velocidad de aparición de CO₂ y de consumo de CH₄ simultáneamente (ecuaciones 2.24 y 2.25).

El procedimiento de cálculo de la integral es el siguiente:

- En primer lugar, se calculan las presiones parciales con las ecuaciones antes dadas (de la 2.17 a la 2.21), las cuales están en función de las conversiones de consumo de CH₄ y de aparición de CO₂.
- El procedimiento normal de integración numérica para una reacción es definir intervalos de conversión y con ellos determinar la progresión de la velocidad, con lo que en este caso se tendría que definir simultáneamente las conversiones α_{CH_4} y α_{CO_2} . No es posible saber a priori cual es una conversión en función de la otra debido a que presentan velocidades de reacción completamente diferentes y en consecuencia diferentes valores. Para solucionarlo, se procede de forma inversa. Tomando de referencia unos intervalos de masa de catalizador a modo de representar la progresión de las especies a lo largo del reactor, se calcula cuales serían las dos conversiones por separado. Una vez calculadas, se calcula cual es la presión parcial de cada compuesto mediante las ecuaciones pertinentes, las cuales tienen en cuenta ambas conversiones. De esta forma, se puede correlacionar la progresión de cada conversión entre sí a lo largo del reactor, cometiendo pequeños errores al calcularlas por separado, pero mitigados porque ambas son determinadas con la misma concentración de especies y misma cantidad de catalizador en cada momento.
- El proceso de integración se para cuando se obtenga la misma cantidad de hidrógeno que la obtenida en el balance de materia o cuando la fracción de salida de los productos es similar.
- En consecuencia, el peso de catalizador será el correspondiente a la suma de los pesos asociados a cada conversión, el cual, a su vez, será el doble del peso de referencia para el cálculo de las conversiones. Esto se debe a que las reacciones tienen lugar en los mismos centros activos y a que se fuerzan a consumir la misma cantidad de catalizador.

A continuación se muestra la Figura A.7 con el procedimiento en forma de esquema o algoritmo.

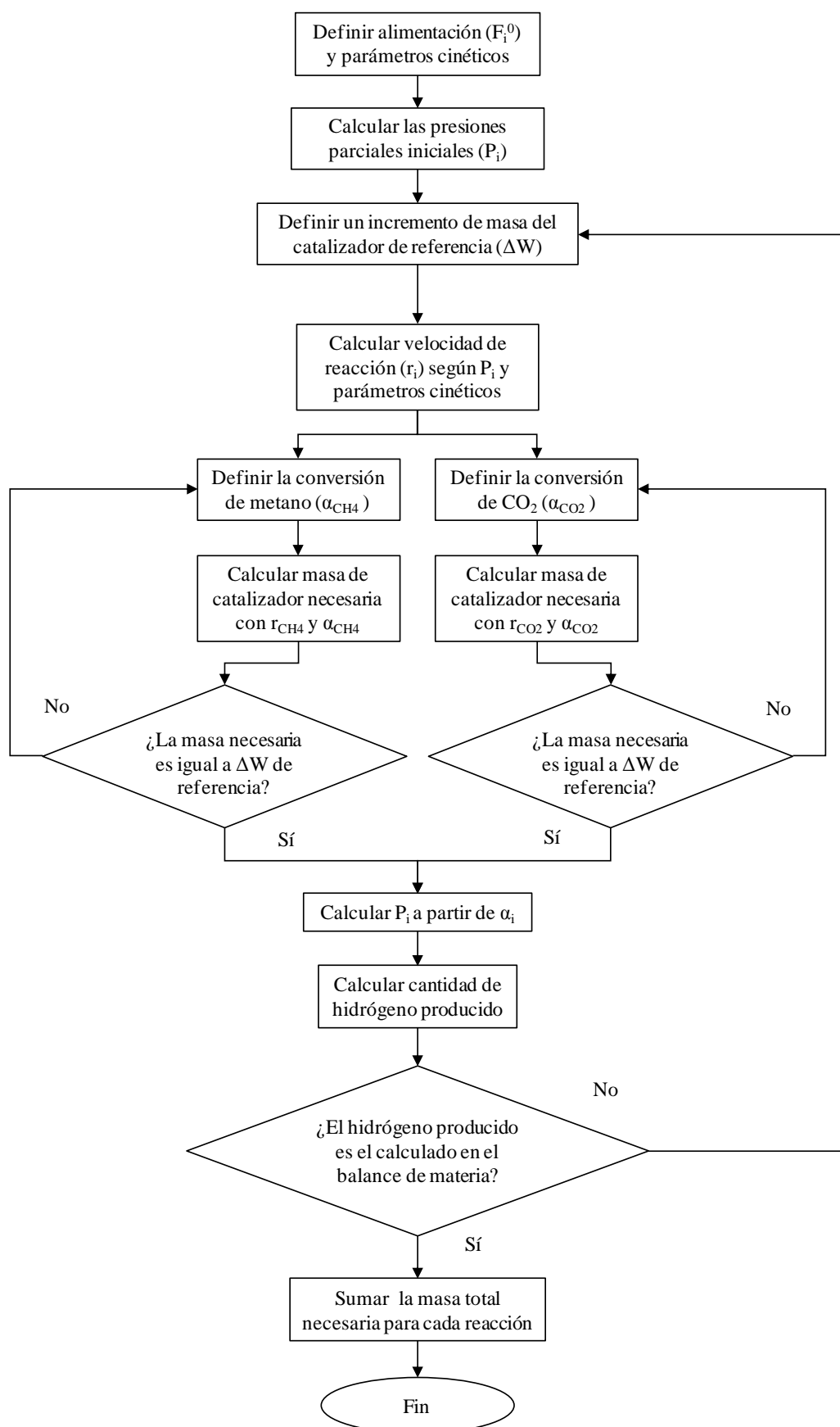


Figura A.7. Representación del proceso de cálculo de la masa de catalizador necesaria

2.3 Balance de energía

El reformador es un sistema con aumento de temperatura y reacciones químicas endotérmicas. En consecuencia, se debe aportar el calor necesario para que se produzcan dichas reacciones y se obtenga la salida a la temperatura requerida. Según lo explicado en el Anexo II: Balances de energía, el cálculo de este calor se puede determinar calentando la alimentación hasta la temperatura de salida y calculando la entalpía de reacción a esta temperatura: [12]

$$Q = F^0 \cdot Cp_{medio} \cdot (T^{sal} - T^0) + \sum_{j=1}^3 \xi_j \cdot \Delta H_{R,j}^{T^{sal}} \quad (2.27)$$

Donde:

Q : calor necesario (kJ/h)

F^0 : número de moles totales de entrada (kmol/h)

Cp_{medio} : calor específico medio (kJ/kmol K)

$\Delta H_{R,j}^{T^{sal}}$: entalpías estándar de reacción a la temperatura de salida T^{sal} del sistema para cada reacción j (kJ/kmol)

ξ_j : grado de avance de cada reacción j (kmol/h)

Donde ξ se calcula como el cociente entre la diferencia de moles de entrada y de salida de un componente i entre su coeficiente estequiométrico o en función de la conversión. [13]

$$\xi_j = \frac{F_i - F_i^0}{\nu_i} = \frac{-\alpha_i \cdot F_i^0}{\nu_i} \quad (2.28)$$

Donde:

F_i : moles de salida de la especie i (kmol/h)

F_i^0 : moles de entrada de la especie i (kmol/h)

ν_i : coeficiente estequiométrico de la especie i en la reacción j

α_i : conversión referida a la especie i en la reacción j

Para estimar las entalpías estándar de cada reacción a cualquier temperatura T se puede aplicar la ley de Hess: [12]

$$\Delta H_{R,j}^T = \sum_i \nu_i \cdot \Delta H_{F,i}^T \quad (2.29)$$

Donde $\Delta H_{F,i}^T$ es la entalpía de formación para cada componente a una temperatura T (kJ/kmol).

2.4 Caída de presión

Para determinar la caída de presión a través de un lecho empacado se puede emplear la siguiente ecuación: [14]

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = \frac{f_k \cdot G^2}{d_p \cdot \rho \cdot g_c} \left(\frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c^3} \right) \quad (2.30)$$

Donde:

P: presión (Pa)

G: velocidad superficial másica del gas (kg/m² s)

ε_c : porosidad del lecho

ρ : densidad de la mezcla de gases (kg/m³)

d_p : diámetro de partícula (m)

g_c : factor de conversión gravitacional (m/s²)

f_k : factor de fricción

El factor de fricción se calcula como: [14]

$$f_k = 1,75 + 150 \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon_c}{d_p \cdot G / \mu} \right) \quad (2.31)$$

Donde μ es la viscosidad de la mezcla de gases (kg/m s).

Para anillos *Raschig* la bibliografía recomienda multiplicar la caída de presión obtenida a partir de la ecuación 2.30 por 0,6, con lo que ésta se transforma en: [14]

$$\frac{\Delta P}{\Delta Z} = 0,6 \cdot \frac{f_k \cdot G^2}{d_p \cdot \rho \cdot g_c} \left(\frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c^3} \right) \quad (2.32)$$

2.5 Diseño mecánico del reactor

2.5.1 Tubos

A continuación se describe el procedimiento de diseño mecánico de los tubos del reformador donde se determinará su espesor de pared. La norma que se aplica al diseño de tubos a presión es ANSI/API Standard 530: *Calculation of Heater Tube Thickness in Petroleum Refineries*. En consecuencia, el diseño de dichos tubos se basará en esta norma. [15]

En función de la temperatura a la que están sometidos se consideran dos diseños: diseño elástico y diseño de ruptura. Para el cálculo del espesor de los tubos se usará en el diseño de ruptura, debido a que es el recomendado para temperaturas superiores a 600 °C. Este método se basa el concepto de daño acumulado como resultado del estrés producido durante la operación normal con el paso del tiempo. [15, 16]

2.5.1.1 Materiales

El catalizador debe ser contenido en tubos de un material que permita una buena transferencia de calor para satisfacer los requerimientos cinéticos. El acero convencional no posee las características adecuadas para soportar las altas temperaturas y presiones a las que trabaja el reformador. Un posible material de bajo coste es una aleación de cromo y níquel con una composición de: Cr 24-28%, Ni 18-22%, C 0,35-0,45%, Mn 2%, Si 2 %, P 0,05% y S 0,05%. Su punto de fusión no es menor a 1370°C, con lo que es válido para temperaturas cercanas a 1150°C. [3]

Normalmente, los reformadores son diseñados para una vida útil de 10 años o 100.000 horas. [3]

Los materiales recogidos por la norma ANSI/API Standard 530 se recogen en la Tabla A.6, con sus máximas temperaturas de diseño.

Tabla A.6. Temperatura límite de diseño de aleaciones para tubos a alta temperatura. Fuente: [15]

Material	Tipo o grado	Temperatura límite de diseño (°C)
Acero al carbono	B	540
Acero C-1/2Mo	T1 o P1	595
Acero 1/4Cr-1/2Mo	T11 o P11	595
Acero 1/2Cr-1Mo	T22 o P22	650
Acero 3Cr-1Mo	T21 o P21	650
Acero 5Cr-1/2Mo	T5 o P5	650
Acero 5Cr-1/2Mo-Si	T5b o P5b	705
Acero 7Cr-1/2Mo	T7 o P7	705
Acero 9Cr-1Mo	T9 o P9	705
Acero 9Cr-1Mo-V	T91 o P91	650
Acero 18Cr-8Ni	304 o 304H	815
Acero 16Cr-12Ni-2Mo	316 o 316H	815
Acero 16Cr-12Ni-2Mo	316L	815
Acero 18Cr-10Ni-Ti	321 o 321H	815
Acero 18Cr-10Ni-Nb	347 o 347H	815
Ni-Fe-Cr	Aleación 800H/800HT	985
25Cr-20Ni	HK40	1010

2.5.1.2 Presión de diseño

La presión de diseño es aquella que se utiliza para diseñar un recipiente presión, la cual presenta un valor de un 10% superior a la presión manométrica normal de trabajo. Esto es debido a que el recipiente debe soportar un poco más de la máxima presión a la que está sometido normalmente para que no se vea afectada la estructura en el caso de sobrepresión. [17]

2.5.1.3 Temperatura de diseño y máximo esfuerzo de rotura permisible

La resistencia de los materiales depende fundamentalmente de la temperatura, decreciendo a medida que ésta aumenta. En consecuencia, el valor del esfuerzo máximo permisible será determinado en función de la temperatura de diseño, la cual se corresponde a la máxima temperatura a la que se ve sometido el reactor sobredimensionada en 50 °F. [17]

2.5.1.4 Diámetro del equipo

El diámetro de los tubos es otro factor que influye en la resistencia que presentan. Cuanto mayor sea la sección más se verá comprometida la fuerza de la estructura, con lo que, en consecuencia, será necesario un mayor espesor de pared.

2.5.1.5 Cálculo de los espesores de pared

El espesor mínimo para tubos a presión y temperaturas elevadas se calcula de la siguiente manera siguiendo el procedimiento de diseño de ruptura: [15]

$$\delta_{min} = \delta_{\sigma} + f_{corr} \cdot \delta_{CA} \quad (2.33)$$

$$\delta_{\sigma} = \frac{P_r \cdot D_i}{2 \cdot \sigma_r - P_r} \quad (2.34)$$

Donde:

δ_{min} : espesor mínimo requerido (mm)

δ_{σ} : espesor debido a la tensión máxima permisible (mm)

δ_{CA} : corrosión permitida (mm)

P_r : presión de diseño (MPa)

D_i : diámetro interno (mm)

σ_r : máximo esfuerzo de ruptura permisible (MPa)

f_{corr} : factor de corrosión (Figura 8)

Para determinar el factor de corrosión se utiliza la Figura A.8 a partir del exponente de ruptura n y del parámetro B . El exponente de ruptura es función de la temperatura y es característico para cada material y B se calcula como: [15]

$$B = \frac{\delta_{CA}}{\delta_{\sigma}} \quad (2.35)$$

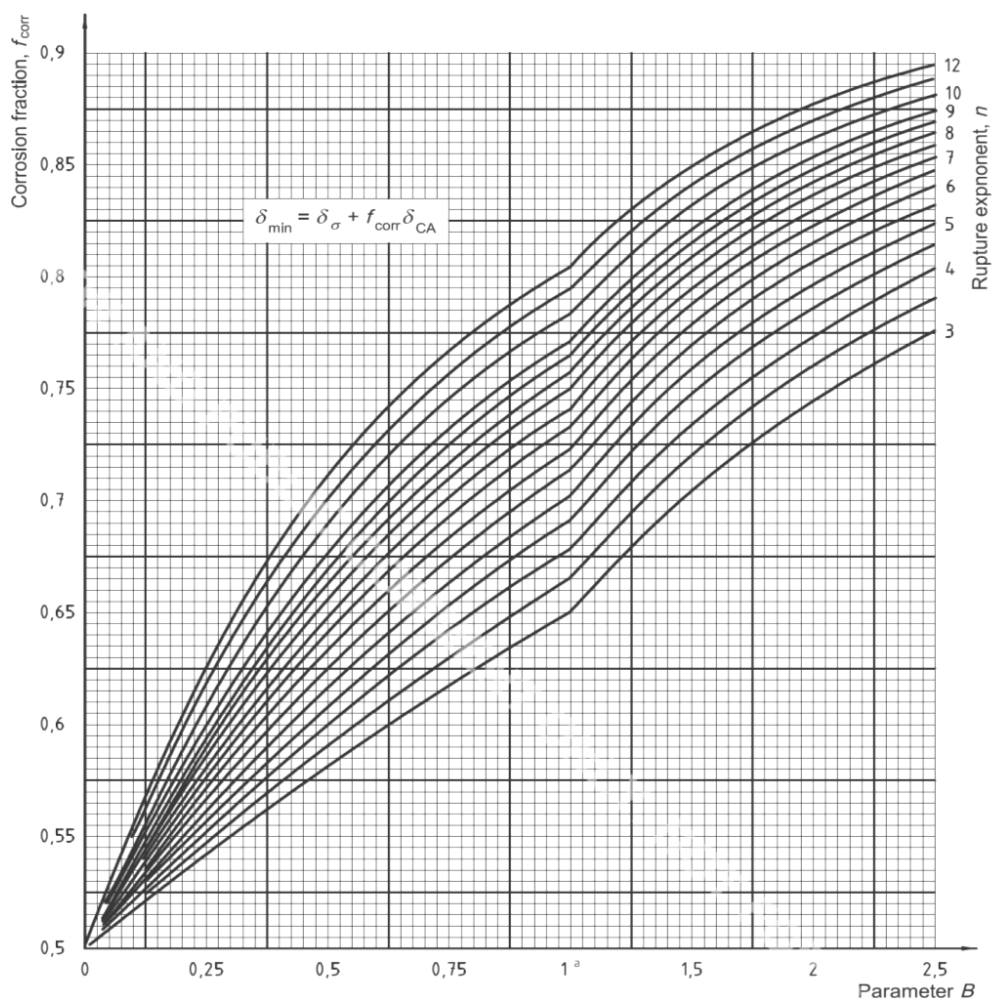


Figura A.8. Factor de corrosión. Fuente: [15]

Los espesores mínimos para diferentes tipos de material y diámetros de tubo se recogen en la Tabla A.7.

Tabla A.7. Espesores mínimos para tubos a presión. Fuente: [15]

Diámetro exterior (mm)	Acero ferrítico (mm)	Acero austenítico (mm)
60,3	3,4	2,4
73,0	4,5	2,7
88,9	4,8	2,7
101,6	5,0	2,7
114,3	5,3	2,7
141,3	5,7	3,0
168,3	6,2	3,0
219,1	7,2	3,3
273,1	8,1	3,7

2.5.2 Paredes de la zona de combustión y estructura

Normalmente, la cámara de combustión está compuesta por una estructura de acero exterior con algún tipo de recubrimiento interno resistente al calor. Debido a las altas temperaturas que se pueden alcanzar en su interior es necesario tener en cuenta una serie de consideraciones a la hora de diseñar su estructura: [18]

- Acomodación a la expansión térmica diferencial.
- Acomodación a la expansión irreversible causada por cambios estructurales en el recubrimiento refractario durante el calentamiento inicial.
- Minimización de la corrosión debida a la alta temperatura.
- Necesidad de la resistencia adecuada.

Básicamente, los materiales utilizados se pueden englobar en dos grupos principales: materiales aislantes que funcionan como recubrimiento interior y carcasa y elementos de soporte hechos por un material metálico. [18]

Las principales propiedades requeridas para el acero o aleación utilizada en los componentes metálicos son: [18]

- Resistencia a la corrosión a alta temperatura.
- Suficiente resistencia mecánica a la temperatura de operación.
- Mantener su estabilidad dimensional a la temperatura de operación.
- Resistencia a la degradación bajo ciclos con condiciones de calentamiento y enfriamiento.

Por otro lado, las propiedades de los materiales de aislamiento deben ser: [19]

- Baja conductividad térmica.
- Resistencia mecánica alta.
- Buena resistencia a cambios en la temperatura.
- Facilidad de instalación.

Según la norma API Standard 560, los materiales usados para cada uno de los elementos presentes se recogen en los apartados adyacentes. [20]

2.5.2.1 Refractarios y aislamiento

Existen fundamentalmente 3 tipos diferentes de recubrimientos: ladrillos individuales, recubrimiento monolítico (cemento refractario) unido a la carcasa con sujeciones metálicas y fibra cerámica. En la Figura A.9 se muestran un ejemplo de cada tipo de recubrimiento. [18]

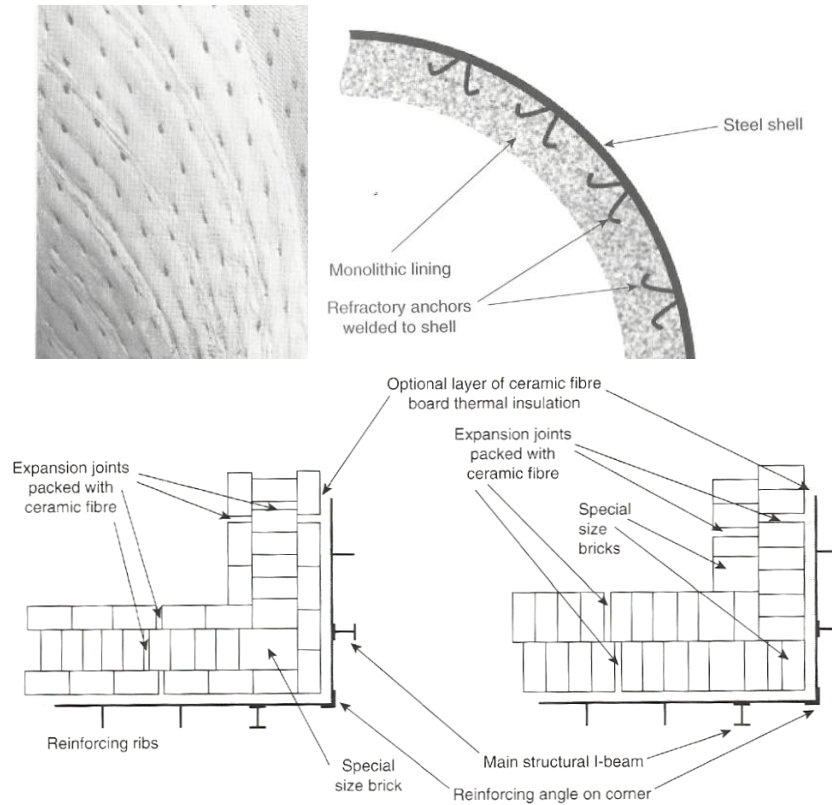


Figura A.9. Fibra cerámica (izquierda), recubrimiento monolítico (derecha) y ladrillos (abajo). Fuente: [18]

En función de su composición, pueden ser clasificados en diferentes grupos: [18]

- Sílice, silicio 97-70% SiO_2 , 0,5-15% Al_2O_3 .
- Alúmina, aluminio 90-20% Al_2O_3 , 5-70% SiO_2 .
- Cromita, magnesita/cromita, magnesita 40-0% Cr_2O_3 , 13-90% MgO .
- Dolomita ~40% MgO , 40-50% CaO .
- Circón, circonio $\text{ZrO}_2\text{:SiO}_2$, >95% ZrO_2 .
- Carbono, carburo de silicio >99% C, >90% SiC.
- Materiales aislantes, diatomita, vermiculita, calcita, fibra cerámica.
- Arena para fundición de sílice depositada.

Estos materiales deben funcionar como aislantes que cumplan las especificaciones de ASTM en forma de: [20]

- Ladrillos de arcilla refractarios, ASTM C27.
- Ladrillos refractarios aislante, ASTM C155.
- Cemento refractario, ASTM C401, Clase N, O, P, Q, o R.
- Vermiculita, ASTM C332, densidad Grupo 1.
- Bloques aislantes (lana de escoria mineral, pH neutro), ASTM C612 CL5.
- Haydite, ASTM C332 Grupo II.

2.5.2.2 Elementos estructurales

Los elementos estructurales deben estar conformes con las siguientes especificaciones:

[20]

- Perfiles estructurales, ASTM A36, A 242, A 572.
- Paneles, ASTM A36, A 283 Grado C, A 242, o A 572.
- Tornillos estructurales, ASTM A 325 o ASTM A 490.
- Tuberías para columnas y pescantes, ASTM A 53 Grado B.

2.5.2.3 Conductos de gases de combustión

Los conductos para los gases de combustión deben ser construidos con materiales conformes a ASTM A 36 o A 242. [20]

2.5.2.4 Soportes para tubos

Los materiales utilizados para los elementos que sujetan a los tubos se recogen en la Tabla 8 con su temperatura máxima de diseño. [20]

Tabla 8. Temperatura límite de diseño de aleaciones para tubos a alta temperatura. Fuente: [20]

Material	Temperatura límite de diseño (°C)
Acero al carbono	427
1/2Cr-1Mo	649
5Cr-1/2Mo	649
19Cr-9Ni	816
25Cr-12Ni	982
25Cr-20Ni	1093
50Cr-50Ni-Cb	982

3. REFORMADOR R-301

3.1 Introducción

El reformador es el principal equipo encargado de la producción de hidrógeno a partir de gas natural. Se corresponde a un reactor multitubular catalítico heterogéneo con un sistema de aporte de calor. Según la bibliografía, el perfil de temperatura a lo largo del reactor se puede aproximar a una progresión lineal [2]. El catalizador está compuesto por níquel sobre un soporte de alúmina formando anillos de 16 mm de diámetro. En este equipo se lleva a cabo la transformación principal del gas natural en hidrógeno y su salida es conducida a otras unidades de conversión posteriores, los reactores HTS y LTS.

En general, los reformadores están formados por dos partes fundamentalmente: la zona de combustión que contiene los cubos cargados de catalizador y una sección convectiva, donde se precalienta la alimentación, la cual es llamada como E-201. La temperatura de los gases de combustión puede alcanzar temperaturas superiores a 1000 K. [3]

Las composiciones y propiedades de las corrientes de entrada a la columna son las recogidas en las Tablas A.9 y A.10:

Tabla A.9. Composiciones de la alimentación del reformador

Componente	Caudal másico (kg/h)	Caudal molar (kmol/h)	X _i (%)
H ₂	51,521	25,761	1,19
N ₂	159,48	5,696	0,26
CO	39,650	1,416	0,06
CO ₂	189,49	4,307	0,20
CH ₄	7953,4	497,09	22,89
C ₂ H ₆	539,95	17,998	0,83
H ₂ O	29147	1619,3	74,57
Total	38081	2171,6	100,00

Tabla A.10. Propiedades de la alimentación del reformador

Propiedad	Valor
Temperatura (°C)	477
Presión (MPa)	1,9

Habitualmente, la velocidad espacial (SV) está en el orden de 5000-8000 $l/l_{cat} h$ en base al flujo total. Debido a la variación del volumen a lo largo del reactor es habitual definir la velocidad espacial por volumen de carbono, la cual presenta valores de 1250-2000 $l_C/l_{cat} h$. [21]

3.2 Balance de materia

En primer lugar, es necesario aportar una serie de consideraciones previas:

- Debido a que la conversión para la reacción R 1.1 no alcanza la conversión de equilibrio por factores cinéticos, se considera que se alcanza el equilibrio a una temperatura inferior, asumiendo un ΔT_R de 11°C.
- La reacción R 1.2 es capaz de alcanzar el equilibrio a la temperatura de salida del reformador.
- Se asume que todos los hidrocarburos con más de dos carbonos por molécula presentes en la materia prima se corresponden únicamente a etano.
- Se considera que la reacción R 1.4 reacciona completamente, con una conversión del 100% de etano.

A partir de las condiciones de salida del proceso, se determina el valor de las constantes de equilibrio con las ecuaciones 1.1 y 1.2 y, en función de ellas, la salida del reactor. El valor de las constantes de equilibrio es:

$$k_{eq1} = 7,701 \cdot 10^6 \text{ kPa}^2$$

$$k_{eq2} = 0,7812$$

A continuación, el cálculo del consumo de moles de cada reacción proporciona los siguientes resultados:

$$F = 436,05 \text{ kmoles/h}$$

$$G = 153,31 \text{ kmoles/h}$$

$$H = 17,998 \text{ kmoles/h}$$

En consecuencia, las conversiones obtenidas son:

$$\alpha_{CH_4} = 87,72\%$$

$$\alpha_{CO_2} = 32,38\%$$

$$\alpha_{C_2H_6} = 100,00\%$$

Por último, a partir de los valores determinados anteriormente, se construye la Tabla A.11, en la que se muestra el balance de materia completo.

Tabla A.11. Balance de materia del reformador

Componente	X_i entrada	Entrada (F_i^0)	Consumo	Generación	Salida (F_i)	X_i salida
i	(%)	Kmol/h	Kmol/h	Kmol/h	Kmol/h	(%)
H ₂	1,19	25,761	0,000	1551,5	1577,2	50,62
N ₂	0,26	5,696	0,000	0,000	5,696	0,18
CO	0,06	1,416	153,31	472,05	320,15	10,28
CO ₂	0,20	4,307	0,000	153,31	157,62	5,06
CH ₄	22,89	497,09	436,05	0,000	61,033	1,96
C ₂ H ₆	0,83	17,998	17,998	0,000	0,000	0,00
H ₂ O	74,57	1619,3	625,36	0,000	993,94	31,90
Total	100,00	2171,6	1232,7	2176,8	3115,7	100,00

3.3 Proceso de integración cinética y cálculo del peso del catalizador

A continuación, en la Tabla A.12, se muestra los flujos iniciales y en las Tablas de la A.13 a la A.18 los resultados obtenidos en el proceso de integración.

Tabla A.12. Flujos molares iniciales en la entrada del reformador considerando una conversión del 100% de la reacción de desaparición de etano

Flujo (kmol/h)							
CH ₄	H ₂ O	CO	H ₂	N ₂	CO ₂	C ₂ H ₆	Total
497,09	1583,3	37,413	115,75	5,696	4,307	0,000	2243,6

Tabla A.13. Masa de referencia y para la integración y perfil de temperatura

Masa de Referencia (kg)		$W/F_{CH_4}^0$ (kg _{cat} h/kmol)	Temperatura (K)
W	ΔW	$W/F_{CH_4}^0$	T
0,0	0,0	0,000	750,00
10,0	10,0	0,020	751,49
20,0	10,0	0,040	752,99
35,0	15,0	0,070	755,22
50,0	15,0	0,101	757,46
70,0	20,0	0,141	760,45
100,0	30,0	0,201	764,93
140,0	40,0	0,282	770,90
190,0	50,0	0,382	778,36
250,0	60,0	0,503	787,31
330,0	80,0	0,664	799,26
430,0	100,0	0,865	814,18
540,0	110,0	1,086	830,60
650,0	110,0	1,308	847,02
760,0	110,0	1,529	863,44
870,0	110,0	1,750	879,86
980,0	110,0	1,971	896,27
1090,0	110,0	2,193	912,69
1210,0	120,0	2,434	930,60
1330,0	120,0	2,676	948,51
1450,0	120,0	2,917	966,43
1570,0	120,0	3,158	984,34
1690,0	120,0	3,400	1002,25
1810,0	120,0	3,641	1020,16
1930,0	120,0	3,883	1038,07
2050,0	120,0	4,124	1055,98
2180,0	130,0	4,386	1075,39
2310,0	130,0	4,647	1094,79
2440,0	130,0	4,909	1114,19
2570,0	130,0	5,170	1133,60
2700,0	130,0	5,432	1153,00

Tabla A.14. Presiones parciales de cada especie

Presiones parciales (kPa)						
CH ₄	H ₂ O	CO	H ₂	N ₂	CO ₂	C ₂ H ₆
420,97	1340,8	31,684	98,027	4,824	3,647	0,000
420,63	1333,8	25,455	105,15	4,822	10,098	0,000
420,27	1327,3	19,846	111,74	4,821	15,953	0,000
419,59	1318,9	12,960	120,44	4,819	23,290	0,000
418,70	1311,9	8,050	127,72	4,816	28,790	0,000
417,20	1304,6	4,300	135,50	4,810	33,544	0,000
414,44	1296,0	2,175	145,00	4,801	37,508	0,000
410,28	1285,8	1,650	156,67	4,786	40,811	0,000
404,71	1273,0	1,890	171,33	4,766	44,284	0,000
397,68	1257,0	2,339	189,72	4,742	48,529	0,000
387,74	1234,4	3,072	215,60	4,707	54,430	0,000
374,48	1204,6	4,289	249,89	4,660	62,060	0,000
358,98	1170,1	6,096	289,57	4,606	70,592	0,000
342,74	1134,5	8,506	330,64	4,548	79,017	0,000
325,96	1098,4	11,630	372,42	4,489	87,083	0,000
308,82	1062,2	15,573	414,37	4,429	94,579	0,000
291,40	1026,3	20,432	456,16	4,368	101,34	0,000
273,74	990,82	26,293	497,57	4,306	107,26	0,000
254,22	952,75	33,915	542,21	4,237	112,67	0,000
234,44	915,42	42,871	586,19	4,167	116,90	0,000
214,46	878,96	53,176	629,37	4,097	119,93	0,000
194,37	843,53	64,781	671,56	4,026	121,73	0,000
174,30	809,34	77,569	712,51	3,956	122,33	0,000
154,44	776,64	91,346	751,88	3,886	121,80	0,000
135,04	745,72	105,86	789,33	3,818	120,24	0,000
116,34	716,87	120,78	824,46	3,752	117,79	0,000
97,209	688,25	136,94	859,52	3,685	114,39	0,000
79,584	662,71	152,65	890,99	3,623	110,44	0,000
63,770	640,53	167,49	918,49	3,567	106,15	0,000
49,995	621,89	181,09	941,77	3,518	101,74	0,000
38,373	606,79	193,20	960,77	3,478	97,39	0,000

Tabla A.15. Parámetros cinéticos

Ctes. de velocidad de reacción			Ctes. de adsorción de cada especie			
k_1	k_2	k_3	K_{CO_2}	K_{H_2}	K_{CH_4}	K_{H_2O}
($\text{kmol} \cdot \text{kPa}^{0.5} /$ $\text{kg}_{\text{cat}} \cdot \text{h}$)	($\text{kmol} /$ $\text{kPa} \cdot \text{kg}_{\text{cat}} \cdot \text{h}$)	($\text{kmol} \cdot \text{kPa}^{0.5} /$ $\text{kg}_{\text{cat}} \cdot \text{h}$)	(kPa^{-1})	(kPa^{-1})	(kPa^{-1})	-
1,797E+00	9,267E-01	2,358E-01	6,856E-02	3,636E-05	3,083E-03	1,179E-01
1,940E+00	9,467E-01	2,548E-01	6,704E-02	3,541E-05	3,046E-03	1,213E-01
2,094E+00	9,671E-01	2,753E-01	6,555E-02	3,449E-05	3,009E-03	1,247E-01
2,346E+00	9,984E-01	3,090E-01	6,339E-02	3,317E-05	2,955E-03	1,301E-01
2,626E+00	1,030E+00	3,466E-01	6,132E-02	3,190E-05	2,902E-03	1,356E-01
3,051E+00	1,074E+00	4,036E-01	5,868E-02	3,029E-05	2,834E-03	1,433E-01
3,810E+00	1,143E+00	5,058E-01	5,496E-02	2,805E-05	2,735E-03	1,556E-01
5,104E+00	1,241E+00	6,807E-01	5,043E-02	2,536E-05	2,610E-03	1,734E-01
7,310E+00	1,372E+00	9,805E-01	4,537E-02	2,240E-05	2,465E-03	1,980E-01
1,115E+01	1,544E+00	1,505E+00	4,007E-02	1,936E-05	2,305E-03	2,313E-01
1,928E+01	1,799E+00	2,627E+00	3,411E-02	1,603E-05	2,112E-03	2,832E-01
3,740E+01	2,165E+00	5,148E+00	2,807E-02	1,275E-05	1,900E-03	3,618E-01
7,540E+01	2,634E+00	1,049E+01	2,283E-02	1,001E-05	1,699E-03	4,687E-01
1,479E+02	3,180E+00	2,081E+01	1,873E-02	7,930E-06	1,526E-03	6,012E-01
2,829E+02	3,812E+00	4,021E+01	1,547E-02	6,340E-06	1,376E-03	7,638E-01
5,280E+02	4,539E+00	7,579E+01	1,288E-02	5,111E-06	1,246E-03	9,618E-01
9,634E+02	5,370E+00	1,396E+02	1,079E-02	4,153E-06	1,132E-03	1,201E+00
1,720E+03	6,315E+00	2,515E+02	9,098E-03	3,399E-06	1,032E-03	1,488E+00
3,162E+03	7,487E+00	4,670E+02	7,605E-03	2,755E-06	9,366E-04	1,863E+00
5,682E+03	8,820E+00	8,468E+02	6,401E-03	2,250E-06	8,531E-04	2,313E+00
9,990E+03	1,033E+01	1,502E+03	5,422E-03	1,852E-06	7,797E-04	2,849E+00
1,721E+04	1,202E+01	2,610E+03	4,620E-03	1,535E-06	7,149E-04	3,483E+00
2,907E+04	1,392E+01	4,446E+03	3,959E-03	1,281E-06	6,576E-04	4,227E+00
4,821E+04	1,604E+01	7,432E+03	3,412E-03	1,075E-06	6,066E-04	5,095E+00
7,857E+04	1,838E+01	1,221E+04	2,955E-03	9,085E-07	5,612E-04	6,103E+00
1,259E+05	2,098E+01	1,971E+04	2,572E-03	7,719E-07	5,205E-04	7,265E+00
2,063E+05	2,408E+01	3,254E+04	2,224E-03	6,510E-07	4,811E-04	8,717E+00
3,320E+05	2,751E+01	5,278E+04	1,934E-03	5,524E-07	4,460E-04	1,039E+01
5,256E+05	3,128E+01	8,416E+04	1,689E-03	4,713E-07	4,145E-04	1,231E+01
8,192E+05	3,541E+01	1,321E+05	1,482E-03	4,044E-07	3,862E-04	1,451E+01
1,258E+06	3,992E+01	2,042E+05	1,307E-03	3,488E-07	3,607E-04	1,700E+01

Tabla A.16. Constantes de equilibrio para cada reacción y cocientes entre productos y reactivos elevados a los coeficientes estequiométricos pertinentes

Constantes de equilibrio			Cociente entre productos Y reactivos		
k_{eq1} (kPa ²)	k_{eq2} -	k_{eq3} (kPa ²)	Q_{R1} (kPa ²)	Q_{R2} -	Q_{R3} (kPa ²)
3,578E+01	6,072E+00	2,172E+02	5,287E+01	8,415E-03	4,450E-01
3,841E+01	6,002E+00	2,305E+02	5,274E+01	3,127E-02	1,649E+00
4,123E+01	5,932E+00	2,446E+02	4,964E+01	6,767E-02	3,359E+00
4,582E+01	5,830E+00	2,672E+02	4,091E+01	1,641E-01	6,714E+00
5,090E+01	5,731E+00	2,917E+02	3,053E+01	3,482E-01	1,063E+01
5,849E+01	5,602E+00	3,276E+02	1,965E+01	8,103E-01	1,592E+01
7,191E+01	5,415E+00	3,894E+02	1,234E+01	1,929E+00	2,382E+01
9,435E+01	5,179E+00	4,887E+02	1,203E+01	3,014E+00	3,625E+01
1,317E+02	4,903E+00	6,459E+02	1,845E+01	3,153E+00	5,818E+01
1,950E+02	4,598E+00	8,964E+02	3,195E+01	3,132E+00	1,001E+02
3,244E+02	4,230E+00	1,372E+03	6,433E+01	3,095E+00	1,991E+02
6,002E+02	3,824E+00	2,295E+03	1,484E+02	3,002E+00	4,453E+02
1,151E+03	3,436E+00	3,956E+03	3,524E+02	2,866E+00	1,010E+03
2,154E+03	3,101E+00	6,678E+03	7,907E+02	2,707E+00	2,140E+03
3,933E+03	2,809E+00	1,105E+04	1,678E+03	2,539E+00	4,259E+03
7,024E+03	2,554E+00	1,794E+04	3,378E+03	2,369E+00	8,002E+03
1,228E+04	2,331E+00	2,862E+04	6,485E+03	2,205E+00	1,430E+04
2,104E+04	2,134E+00	4,489E+04	1,194E+04	2,049E+00	2,447E+04
3,705E+04	1,945E+00	7,204E+04	2,232E+04	1,891E+00	4,220E+04
6,385E+04	1,779E+00	1,136E+05	4,024E+04	1,746E+00	7,026E+04
1,079E+05	1,632E+00	1,760E+05	7,033E+04	1,615E+00	1,136E+05
1,787E+05	1,502E+00	2,685E+05	1,197E+05	1,496E+00	1,790E+05
2,909E+05	1,387E+00	4,035E+05	1,989E+05	1,388E+00	2,761E+05
4,655E+05	1,284E+00	5,977E+05	3,237E+05	1,291E+00	4,179E+05
7,328E+05	1,192E+00	8,735E+05	5,170E+05	1,202E+00	6,215E+05
1,136E+06	1,109E+00	1,260E+06	8,116E+05	1,122E+00	9,103E+05
1,797E+06	1,029E+00	1,849E+06	1,300E+06	1,043E+00	1,356E+06
2,796E+06	9,570E-01	2,676E+06	2,047E+06	9,727E-01	1,991E+06
4,284E+06	8,923E-01	3,823E+06	3,177E+06	9,088E-01	2,887E+06
6,470E+06	8,340E-01	5,396E+06	4,865E+06	8,508E-01	4,139E+06
9,635E+06	7,812E-01	7,527E+06	7,359E+06	7,981E-01	5,873E+06

Tabla A.17. Velocidad de consumo de CH₄, conversión y cálculo de la masa necesaria

r_{CH_4} (kmol/kg _{cat} h)	$1/r_{CH_4}$	$1/r_{CH_4}$ media	ΔW	$W/F_{CH_4}^0$ (kg _{cat} h/kmol)	$\Delta \alpha_{CH_4}$	α_{CH_4}
0,026	37,799	-	0,0	0,000	0,0000	0,0000
0,028	35,509	36,654	10,0	0,020	0,0005	0,0005
0,032	30,812	33,161	10,0	0,040	0,0006	0,0012
0,043	23,333	27,073	15,0	0,070	0,0011	0,0023
0,055	18,033	20,683	15,0	0,101	0,0015	0,0037
0,070	14,294	16,163	20,0	0,141	0,0025	0,0062
0,083	12,108	13,201	30,0	0,201	0,0046	0,0108
0,090	11,083	11,596	40,0	0,282	0,0069	0,0177
0,096	10,444	10,764	50,0	0,382	0,0093	0,0271
0,102	9,803	10,123	60,0	0,503	0,0119	0,0390
0,110	9,061	9,432	80,0	0,664	0,0171	0,0561
0,120	8,315	8,688	100,0	0,865	0,0232	0,0792
0,130	7,688	8,002	110,0	1,086	0,0277	0,1069
0,139	7,217	7,453	110,0	1,308	0,0297	0,1366
0,146	6,852	7,034	110,0	1,529	0,0315	0,1680
0,153	6,550	6,701	110,0	1,750	0,0330	0,2010
0,159	6,280	6,415	110,0	1,971	0,0345	0,2355
0,166	6,025	6,153	110,0	2,193	0,0360	0,2715
0,174	5,756	5,890	120,0	2,434	0,0410	0,3125
0,182	5,502	5,629	120,0	2,676	0,0429	0,3554
0,190	5,272	5,387	120,0	2,917	0,0448	0,4002
0,197	5,077	5,174	120,0	3,158	0,0467	0,4469
0,203	4,927	5,002	120,0	3,400	0,0483	0,4951
0,207	4,832	4,880	120,0	3,641	0,0495	0,5446
0,208	4,803	4,818	120,0	3,883	0,0501	0,5947
0,206	4,853	4,828	120,0	4,124	0,0500	0,6447
0,199	5,016	4,934	130,0	4,386	0,0530	0,6977
0,188	5,326	5,171	130,0	4,647	0,0506	0,7483
0,171	5,833	5,579	130,0	4,909	0,0469	0,7951
0,151	6,609	6,221	130,0	5,170	0,0420	0,8372
0,129	7,767	7,188	130,0	5,432	0,0364	0,8736
Suma W			2700,0	kg _{cat}		

Donde r_{CH_4} es calculado a partir de las presiones parciales de cada especie para cada momento, $1/r_{CH_4}$ medio es la media entre dos valores consecutivos de la inversa de la velocidad y la conversión de CH_4 es estimada de tal forma que la variación de la masa ΔW calculada sea igual a la de referencia. Para el cálculo de ΔW se emplea la siguiente fórmula: [11]

$$\Delta W = \frac{1}{r_{CH_4}^{media}} \cdot \Delta \alpha_{CH_4} \cdot F_{CH_4}^0 \quad (3.1)$$

Tabla A.18. Velocidad de aparición de CO₂, conversión y cálculo de la masa necesaria

r_{CO_2} (kmol/kg _{cat} h)	$1/r_{CO_2}$	$1/r_{CO_2}$ media	ΔW	$W/F_{CH_4}^0$ (kg _{cat} h/kmol)	Δa_{CO_2}	a_{CO_2}
0,794	1,260	-	0,0	0,000	0,0000	0,0000
0,733	1,365	1,312	10,0	0,020	0,0153	0,0153
0,656	1,525	1,445	10,0	0,040	0,0139	0,0293
0,518	1,931	1,728	15,0	0,070	0,0175	0,0467
0,375	2,669	2,300	15,0	0,101	0,0131	0,0598
0,228	4,389	3,529	20,0	0,141	0,0114	0,0712
0,123	8,155	6,272	30,0	0,201	0,0096	0,0809
0,087	11,518	9,836	40,0	0,282	0,0082	0,0890
0,087	11,471	11,495	50,0	0,382	0,0088	0,0978
0,092	10,850	11,160	60,0	0,503	0,0108	0,1086
0,097	10,276	10,563	80,0	0,664	0,0152	0,1238
0,103	9,753	10,014	100,0	0,865	0,0201	0,1439
0,106	9,461	9,607	110,0	1,086	0,0230	0,1670
0,106	9,429	9,445	110,0	1,308	0,0234	0,1904
0,104	9,644	9,537	110,0	1,529	0,0232	0,2136
0,099	10,097	9,871	110,0	1,750	0,0224	0,2360
0,093	10,797	10,447	110,0	1,971	0,0212	0,2572
0,085	11,790	11,294	110,0	2,193	0,0196	0,2768
0,075	13,307	12,548	120,0	2,434	0,0192	0,2960
0,064	15,549	14,428	120,0	2,676	0,0167	0,3128
0,053	19,006	17,277	120,0	2,917	0,0140	0,3267
0,040	24,823	21,914	120,0	3,158	0,0110	0,3378
0,028	36,060	30,441	120,0	3,400	0,0079	0,3457
0,016	64,434	50,247	120,0	3,641	0,0048	0,3505
0,005	215,349	139,892	120,0	3,883	0,0017	0,3522
-0,005	-210,714	-182,318	120,0	4,124	-0,0011	0,3511
-0,015	-65,604	-138,159	130,0	4,386	-0,0040	0,3471
-0,025	-40,737	-53,171	130,0	4,647	-0,0064	0,3407
-0,032	-31,414	-36,076	130,0	4,909	-0,0083	0,3323
-0,037	-27,075	-29,244	130,0	5,170	-0,0097	0,3227
-0,040	-25,015	-26,045	130,0	5,432	-0,0105	0,3122
Suma W			2700,0	kg_{cat}		

De la misma forma, el cálculo de ΔW para la segunda integración se realiza mediante:
[11]

$$\Delta W = \frac{1}{r_{CO_2 media}} \cdot \Delta \alpha_{CO_2} \cdot F_{CH_4}^0 \quad (3.2)$$

Cabe destacar que la velocidad de aparición de CO_2 se vuelve negativa en el tramo final del reactor. Esto es debido a que la reacción de formación de CO_2 alcanzó el equilibrio, pero como las demás reacciones siguen produciéndose, ésta es forzada a invertirse para evitar superar el equilibrio.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en forma gráfica en las Figuras de la A.10 hasta la A.15.

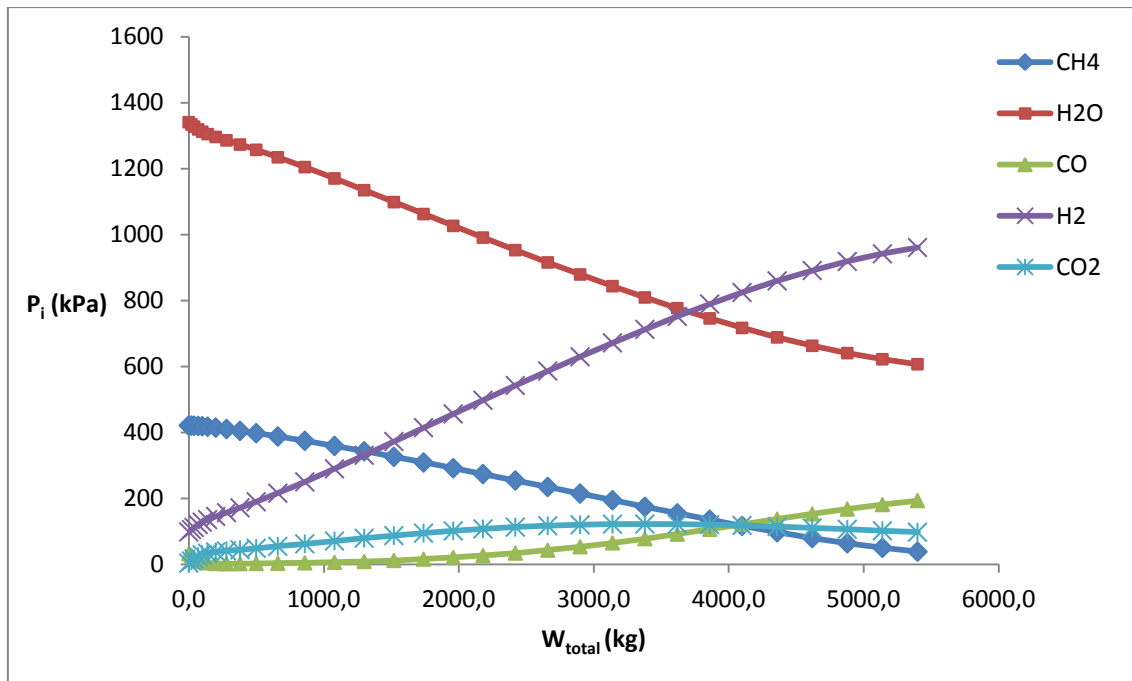


Figura A.10. Progresión de las presiones parciales a lo largo del reactor

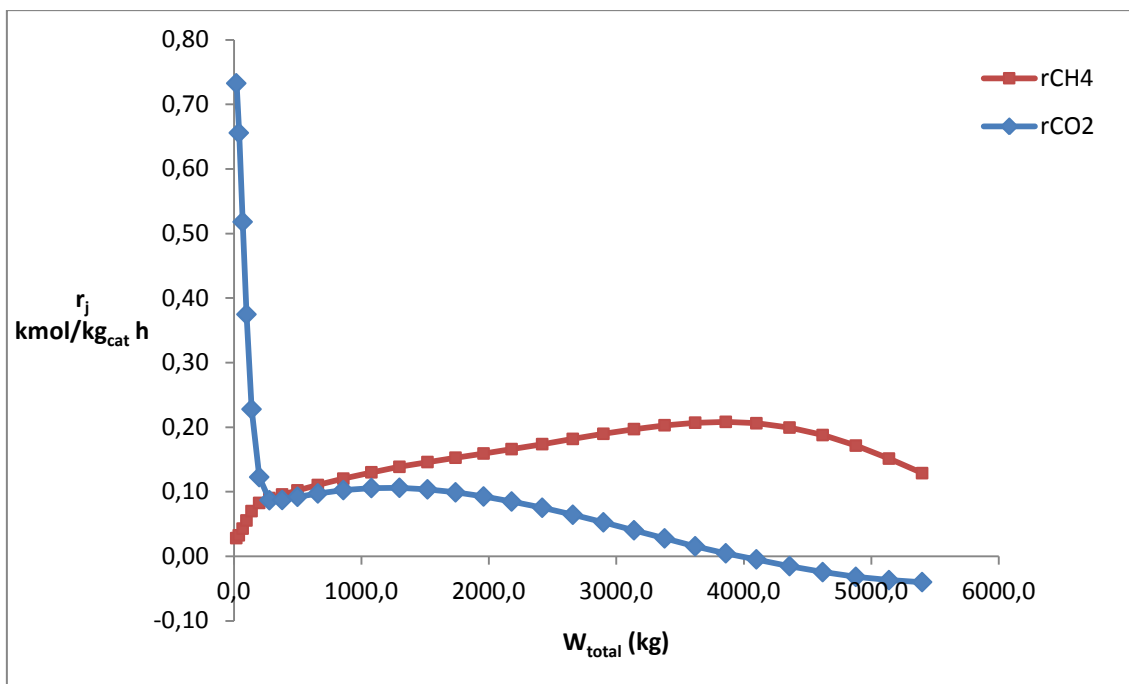


Figura A.11. Velocidad de aparición de CO_2 y de desaparición de CH_4 a lo largo del reactor

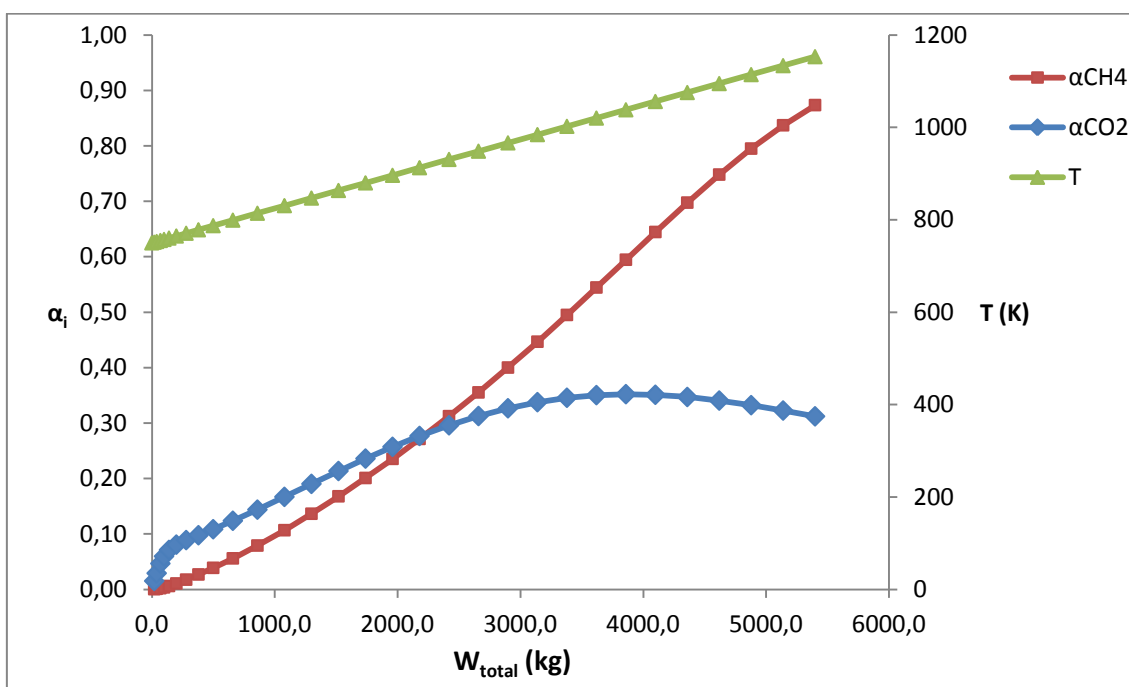


Figura A.12. Variación de las conversiones de CH_4 y CO_2 y de la temperatura a lo largo del reactor

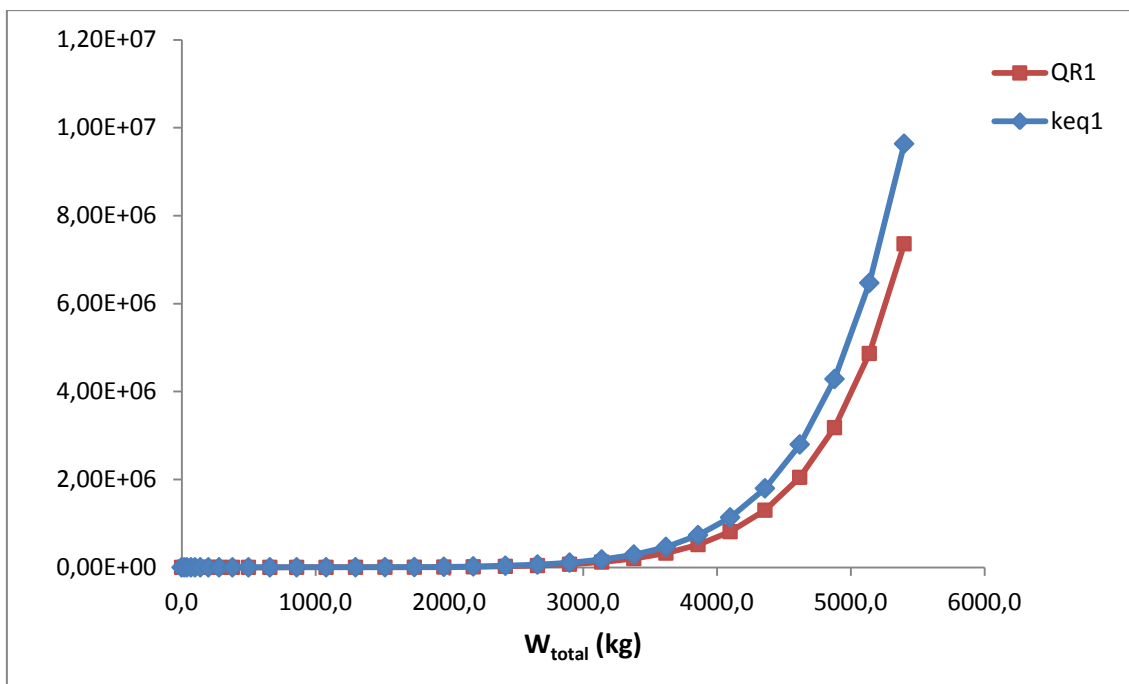


Figura A.13. Variación de la constante de equilibrio 1 y el ratio entre productos y reactivos correspondiente en kPa^2

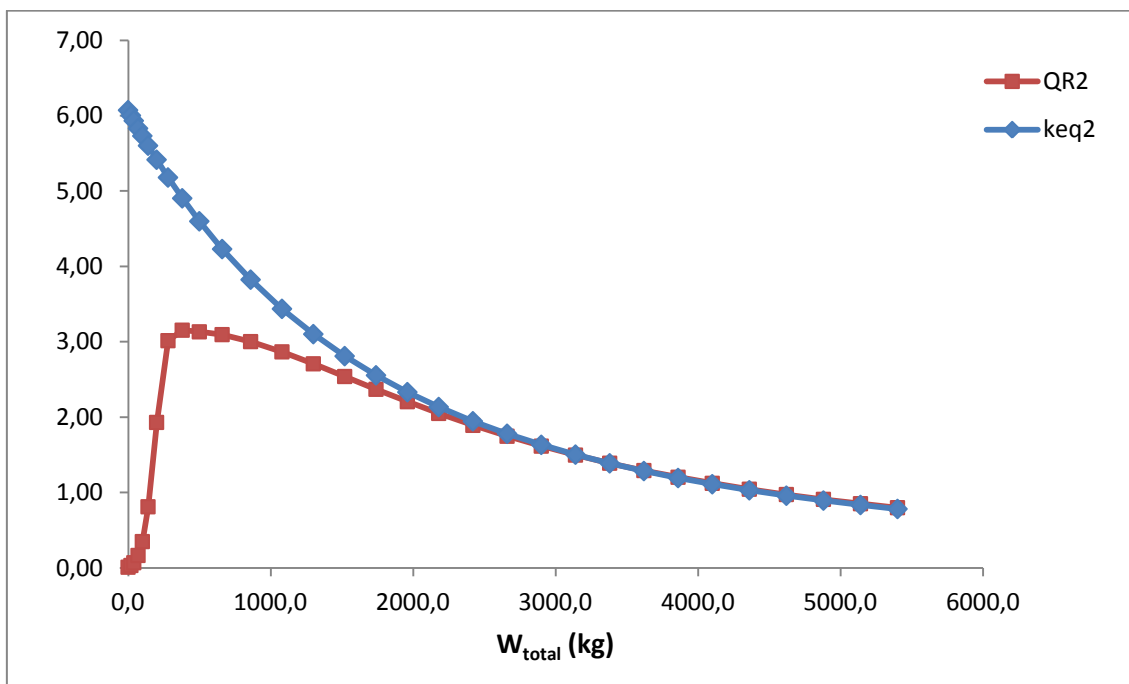


Figura A.14. Variación de la constante de equilibrio 2 y el ratio entre productos y reactivos correspondiente

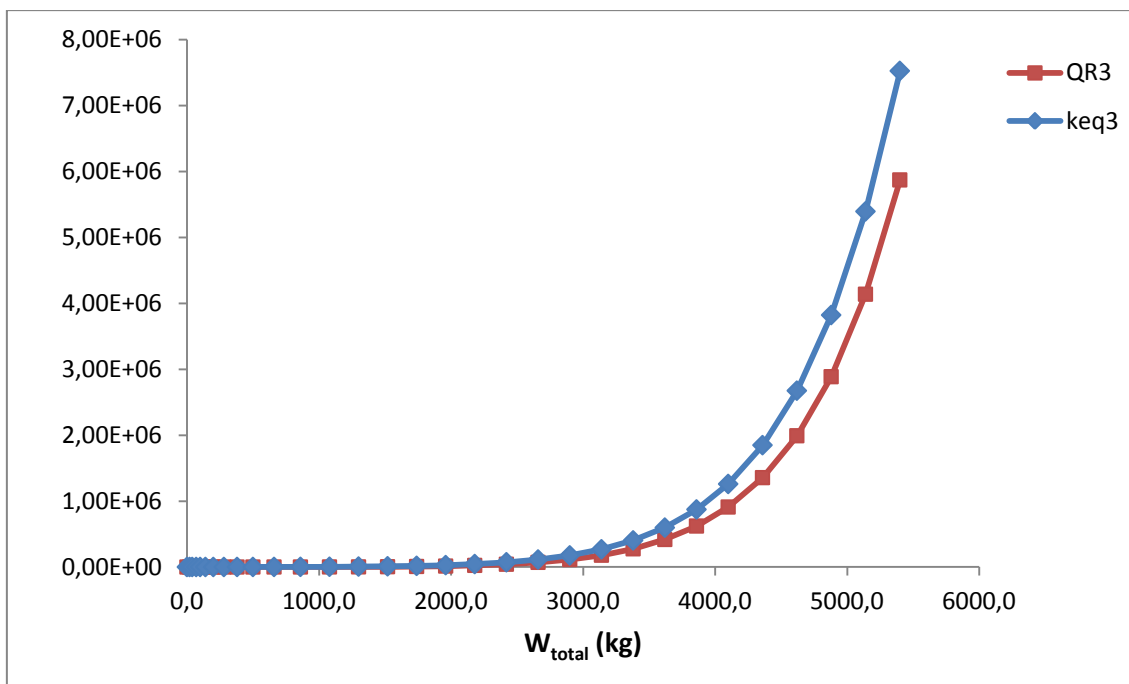


Figura A.15. Variación de la constante de equilibrio 3 y el ratio entre productos y reactivos correspondiente en kPa^2

El hidrógeno producido se puede calcular como: [5]

$$F_{H_2} = F_{H_2}^0 + F_{CH_4}^0 (3 \cdot \alpha_{CH_4} + \alpha_{CO_2}) \quad (3.3)$$

El valor obtenido es de 1573,7 kmol/h. El error cometido respecto al balance de materia es:

$$\frac{1577,2 - 1573,7}{1577,2} \cdot 100 = 0,22\%$$

Debido a que la diferencia entre ambos valores es muy pequeña y que la fracción molar de cada componente a la salida (Tabla A.19) es muy similar a la obtenida en el balance de materia, se considera que el tiempo de residencia alcanzado es adecuado para obtener la cantidad de hidrógeno especificada.

Tabla A.19. Fracción molar de los productos de salida obtenida a partir de la integración de la velocidad de reacción

CH ₄	H ₂ O	CO	H ₂	N ₂	CO ₂	C ₂ H ₆
0,020	0,319	0,102	0,506	0,002	0,051	0,000

Teniendo en cuenta que el peso necesario de catalizador es la suma de lo obtenido en cada integración, se obtienen los siguientes resultados:

$$W_{total} = 5400,0 \text{ kg}$$

$$\frac{W_{total}}{F_{CH_4}^0} = 10,86 \text{ kg}_{cat} \text{ h/kmol}$$

El valor de la velocidad espacial (SV) por volumen de carbono se calcula como: [21]

$$SV = \frac{\text{Caudal de carbono (l/h)}}{\text{Volumen reactor (l}_{cat})} \quad (3.4)$$

El valor obtenido para la integración es:

$$SV = 1224,4 \text{ l/h} \cdot l_{cat}$$

Según la bibliografía, se encuentra dentro del rango de valores típicos para los reformadores de gas natural. [21]

3.4 Balance de energía

A continuación se muestran las entalpías de formación de cada especie a 1153 K en la Tabla A.20.

Tabla A.20. Entalpías de formación a 1153 K. Fuente: [22, 23]

Especie	$\Delta H_{F,i}^0$ (kJ/mol)
CH ₄	-91,094
CO ₂	-394,944
H ₂	0,000
H ₂ O	-248,728
CO	-112,902
C ₂ H ₆	-84,670

Los coeficientes estequiométricos de cada especie para cada reactor se recogen en la Tabla A.21.

Tabla A.21. Coeficientes estequiométricos de las reacciones

Especie	Reacción (R 1.1)	Reacción (R 1.2)	Reacción (R 1.4)
CH ₄	-1		
CO ₂		1	
H ₂	3	1	5
H ₂ O	-1	-1	-2
CO	1	-1	2
C ₂ H ₆			-1

A partir de estos datos, se calcula la entalpía de cada reacción a la temperatura de salida del reactor con la ecuación 2.29:

$$\Delta H_{R,1}^{Tsal}(1153K) = 226,920 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{R,2}^{Tsal}(1153K) = -33,314 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{R,4}^{Tsal}(1153K) = 356,322 \text{ kJ/mol}$$

El grado de avance de cada reacción se puede calcular en función de la conversión a partir de la ecuación 2.28 proporcionando los siguientes valores:

$$\xi_1 = 436,05 \text{ kmol/h}$$

$$\xi_2 = 153,31 \text{ kmol/h}$$

$$\xi_4 = 17,998 \text{ kmol/h}$$

El calor específico medio de cada especie se muestra en la Tabla A.22.

Tabla A.22. Calores específicos medios de cada especie entre 750 y 1153 K. Fuente: [22, 23]

Especie	C _p i (kJ/kmol K)
CH ₄	66,66
CO ₂	52,49
H ₂	30,00
H ₂ O	40,01
CO	32,44
C ₂ H ₆	113,85
N ₂	32,00

A partir de estos resultados se calcula el valor del calor necesario para las reacciones con la ecuación 2.27 proporcionando el siguiente valor:

$$Q = 1,410 \cdot 10^8 \text{ kJ/h}$$

Aún así, el calor suministrado por el reformador es mayor debido a que hay que tener en cuenta la energía cedida en la sección de convección, tanto para precalentar la alimentación como para producir vapor de agua, entre otros. La eficiencia térmica suele tener valores entre 0,85 y 0,93, lo cual aumenta también los requerimientos energéticos. [24] Por ello, según la capacidad de la presente planta, de acuerdo a la bibliografía, se puede estimar que el gasto total de energía es entorno a 60 MW. [25]

3.5 Dimensionamiento del reactor y diseño mecánico

3.5.1 Cálculo del número de tubos

El volumen de reactor necesario se puede calcular como:

$$V = \frac{W_{total}}{\rho_p} \cdot (1 - \varepsilon_p) \quad (3.5)$$

Donde V es el volumen en metros cúbicos.

Aplicando los valores recogidos en la Tabla A.5 y la masa necesaria se obtiene un valor de:

$$V = 9,857 \text{ m}^3$$

Según datos bibliográficos, el lecho debe repartirse en tubos de entre 7,5 y 12 metros de largo y entre 7 y 13 cm de diámetro. Si el diámetro de los tubos es demasiado grande la resistencia a la transmisión de calor será muy elevada, afectando negativamente a la cinética de la transformación. Por otro lado, si son demasiado finos la caída de presión será muy alta. En la práctica, se sacrifica en parte la caída de presión a favor de la transmisión de calor. [3]

Se eligen tubos de dimensiones 10 m de largo y 0,1 m de diámetro. En consecuencia, el número de tubos requerido es:

$$N^{\circ} = \frac{9,857}{10 \cdot \pi \cdot 0,1^2/4} \approx 126 \text{ tubos}$$

3.5.2 Selección del material de los tubos

Dentro de los materiales válidos a la temperatura de trabajo se pueden encontrar las aleaciones 800H/800HT y HK40. El material elegido para los tubos del reformador es la aleación inoxidable austenítica *ASTM A 608 Grade HK40* (25Cr-20Ni) debido a su mayor resistencia que las aleaciones 800H/800HT. Su composición química es la mostrada en la Tabla A.23. [26]

Tabla A.23. Composición de la aleación HK40. Fuente: [26]

Componente	Composición
C	0,35-0,45
Mn	0,4-1,5
Si	0,5-1,5
Cr	23-27
Ni	19-22
P	0-0,03
S	0-0,03

Sus principales propiedades se recogen en la Tabla A.24.

Tabla A.24. Propiedades físicas de la aleación HK40. Fuente: [26]

Propiedad	Valor
Densidad (lb/in ³)	0,280
Punto de fusión (°F)	2540
Conductividad térmica a 1800 °F (Btu/ft h °F)	17,1
Expansión térmica a 1800 °F (10 ⁻⁶ in/in °F)	10,2

3.5.3 Cálculo del espesor de los tubos

La temperatura máxima a la que están sometidos los tubos es la de los gases de combustión que presenta un valor máximo de 950°C, con lo que se obtiene el siguiente valor de la temperatura de diseño:

$$T_d = 977,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Se sobredimensiona la presión máxima de los tubos, en presión manométrica, un 10%, cuyo resultado es mostrado a continuación:

$$P_r = 1,98 \text{ MPa}$$

Las curvas de esfuerzo para esta aleación se recogen en la Figura A.16.

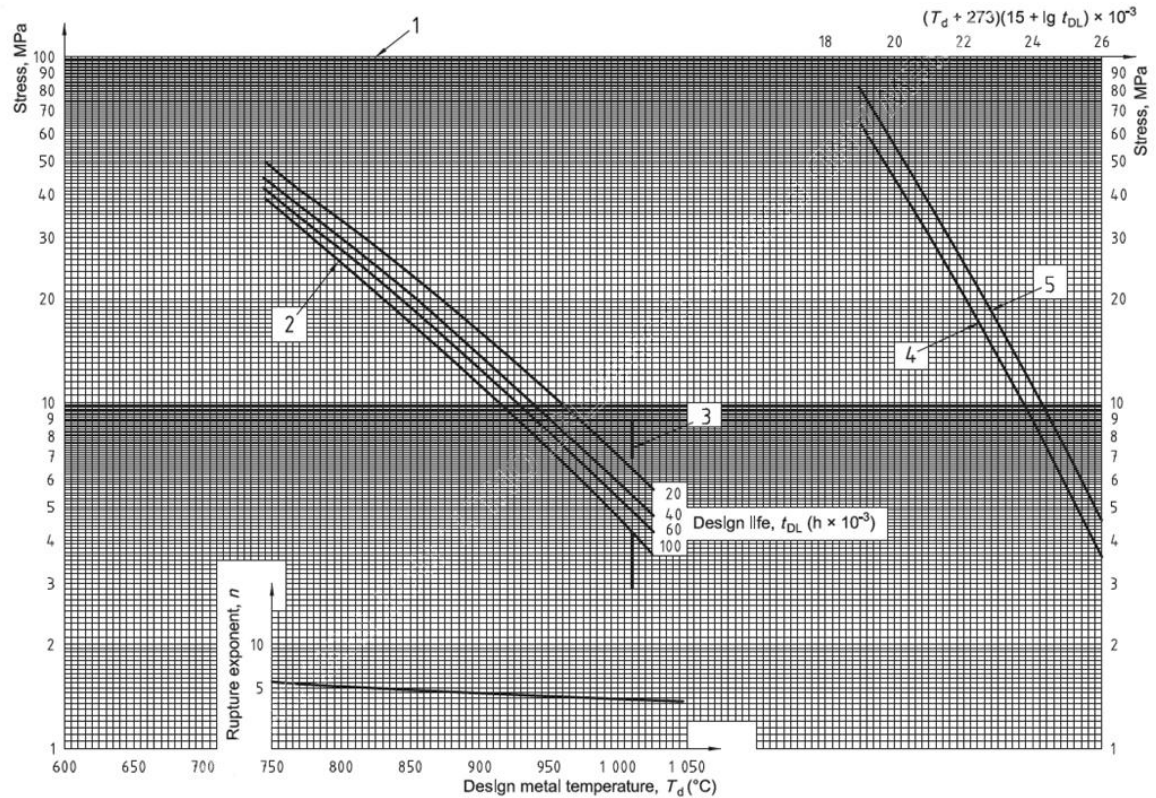


Figura A.16. Curvas de esfuerzo para la aleación HK40. Fuente: [15]

Donde:

- 1: Esfuerzo elástico permitido mejor que 100 MPa
- 2: Máximo esfuerzo permitido de ruptura, σ_r
- 3: Temperatura límite de diseño
- 4: Mínimo esfuerzo de ruptura
- 5: Esfuerzo de ruptura medio

En primer lugar, a partir de la Figura A.16, utilizando como parámetros de entrada T_d de 977,8 °C y t_{DL} de 100.000 horas de funcionamiento, se obtiene un valor de:

$$\sigma_r = 6 \text{ MPa}$$

En consecuencia, el espesor debido a la tensión mediante la ecuación 2.34 es de:

$$\delta_\sigma = 19,76 \text{ mm}$$

El siguiente paso es determinar el factor de corrosión. Para ello se utiliza la Figura A.8 a partir del exponente de ruptura n y del parámetro B . El exponente de ruptura se determina a partir de la Figura A.16 y B a partir de la ecuación 2.35.

Se considera como máximo espesor de corrosión de 3 mm (δ_{CA}).

Para unos valores obtenidos de n igual a 4 y B igual a 0,15, el factor de corrosión es:

$$f_{corr} = 0,525$$

El valor final para el espesor mínimo de la pared de los tubos a partir de la ecuación 2.33 es:

$$\delta_{min} = 21,34 \text{ mm}$$

A continuación, se muestra la Tabla A.25 con un resumen con todos los valores de los parámetros usados.

Tabla A.25. Datos y resultados obtenidos en el cálculo del espesor de los tubos del reformador

Parámetro	Valor
T_{DL} (h)	100000
T_d (°C)	977,8
P_r (MPa)	1,98
D_i (mm)	100
σ_r (MPa)	6
δ_σ (mm)	19,76
δ_{CA} (mm)	3,0
n (-)	4
f (-)	0,525
δ_{min} (mm)	21,34

3.5.4 Dimensionamiento de la zona de combustión

Para el dimensionamiento de la cámara calefactora es necesario definir previamente el espaciado entre tubos y quemadores. Acorde a lo recomendado por la bibliografía, se toma un valor de 2 para el espaciado entre tubos (CCD). Esto es, la distancia entre tubos es dos veces el diámetro externo de cada uno. [16]

Según la bibliografía, el ratio entre tubos y quemadores presenta valores de entre 2 y 3, con lo que, en consecuencia, se elige el número de quemadores de 52. La distancia entre quemadores y de quemadores a tubos y paredes es de aproximadamente un 1 metro. [25]

Los tubos se distribuyen en tres filas de 42 tubos, intercaladas con cuatro de 13 quemadores cada una. En consecuencia, las dimensiones de la zona de combustión es de 8 metros de ancho, 14 metros de largo y 10 metros de alto.

En la Figura A.17 se realiza una representación gráfica de la vista desde arriba del reformador.

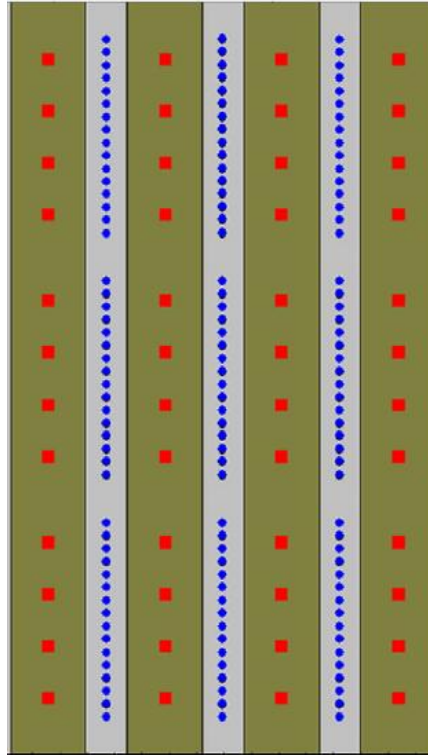


Figura A.17. Esquema del interior del reformador R-201 visto desde arriba. Adaptado de: [25]

3.1 Caída de presión

Las propiedades medias del fluido entre 750 K y 1153 K a 1,9 MPa y demás parámetros necesarios para el cálculo de la caída de presión se recogen en la Tabla A.26. Los cálculos necesarios fueron hechos a partir de las ecuaciones 2.31 y 2.32.

Tabla A.26. Parámetros necesarios para el cálculo de la caída de presión del reformador

Propiedad	Valor
P^0 (MPa)	1,9
L (m)	10
d_p (m)	0,016
ε_c	0,57
μ (kg/m s)	$2,7 \cdot 10^{-5}$
ρ (kg/m ³)	0,85
V (m/s)	12,576
G (kg/m ² s)	10,689
f_k	1,76

La caída de presión para el reformador presenta un valor obtenido a partir de la ecuación 2.32 de:

$$\Delta P = 0,206 \text{ MPa}$$

Dicho valor se encuentra en el rango definido en la bibliografía. [24]

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] DIAS SILVA, J., MORAES de ABREU, C. A. Modelling and simulation in conventional fixed-bed and fixed-bed membrane reactors for the steam reforming of methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, volumen 30, 1-15. ISSN 0360-3199
- [2] TOMINAGA, H., TAMAKI M., *Chemical Reactor and Reactor Design*, 1ª edición, Londres (Gran Bretaña): Wiley and Maruzen , 1998. ISBN 0-471-97792-6
- [3] TWIGG, Martyn V., *Catalyst handbook*. 2ª edición, Londres: Wolfe Publishing, 1989. ISBN 0-7234-0857-2
- [4] XU, J., FROMENT, G. F. Methane Steam Reforming, Methanation and Water-Gas Shift: I. Intrinsic Kinetics. *AIChE Journal*, 1989, volumen 35, nº 1, 88-96. ISSN 1547-5905
- [5] QI, Y., CHENG, Z., ZHOU, Z. Steam reforming of methane over Ni catalysts prepared from hydrotalcite-type precursors: Catalytic activity and reaction kinetics. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015, volumen 23, 76-85. ISSN 1004-9541
- [6] XU, J., FROMENT, G. F. Methane Steam Reforming: II. Diffusional Limitations and Reactor Simulation. *AIChE Journal*, 1989, volumen 35, nº 1, 97-103. ISSN 1547-5905
- [7] ERTL, G., KNOZINGER, H., WEITKAMP, J., *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, Volumen 4. 1ª edición, Weinheim (Alemania): Wiley-VCH, 1997. ISBN 3-527-29212-8
- [8] AL-MEGEREN, H., XIAO, I. Natural Gas Dual Reforming Catalyst and Process. En: AL-MEGEREN, Hamid. *Advances in Natural Gas Technology* [en línea]: Intech, 2012, 388-406. ISBN: 978-953-51-0507-7 [consultado el 26 abril de 2016]. Disponible en: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-natural-gas-technology>
- [9] OLIVEIRA, E. L. G., GRANDE, C. A., RODRIGES, A. E. Steam Methane Reforming in a Ni/Al₂O₃ Catalyst: Kinetics and Diffusional Limitations in Extrudates. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2009, volumen 87, 945-956. ISSN 1939-019
- [10] PERRY, R. H., GREEN, W., MALONEY, J. O. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 5ª edición, EE. UU.: McGraw-Hill, 1984. ISBN 0-07-049479-7
- [11] LEVENSPIEL, O., *Ingeniería de las reacciones químicas*, 3ª edición, México: Limusa Wiley, 2004. ISBN 968-18-5860-3

- [12] COSTA NOVELLA, E., *Ingeniería química*, Tomo I: Conceptos Generales, 1ª edición, España: Editorial Alhambra, 1983. ISBN 84-205-0990-6
- [13] FELDER, R. M., ROUSSEAU, R. W., *Principios elementales de los procesos químicos*, 3ª edición, México: Limusa Wiley, 2003. ISBN 968-18-6169-8
- [14] RASE, H. F., *Chemical reactor design for process plants, Volume One: Principle and Techniques*, 1ª edición, Nueva York (EE. UU.): John Wiley & Sons, 1977. ISBN 0-471-01891-0
- [15] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, *Calculation of Heater Thickness in Petroleum Refineries*, 5ª edición, Washington (EE. UU.): American Petroleum Institute, 2003. ANSI/API Standard 530 / ISO 13704:2001
- [16] EBRAHIMI, H., ZAMANIYAN, A., HOSSEINI, R., FORSAT, K. Analysis of reformer furnace tubes for hydrogen production using radiative zonal model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, volumen 39, 13164-13173. ISSN 0360-3199
- [17] SINNOTT, R., TOWLER, G. *Diseño en ingeniería química*. 5ª edición, Barcelona: Reverté, 2009. ISBN 978-84-291-7199-0
- [18] MULLINGER, P., JENKINS, B., *Industrial and process furnaces*, Amsterdam: Elsevier, 2008. ISBN 9780750686921
- [19] TRAMBOUZE, P., *Petroleum refining*, Tomo 4: Materials and equipment, París: Technip, 2001. ISBN 2-7108-0761-0
- [20] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, *Fired Heaters for General Refinery Service*, 3ª edición, Washington (EE. UU.): American Petroleum Institute, 2001. API Standard 560
- [21] McKETTA, J. J., *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*, Volumen 26, Nueva York (EE. UU.): Marcel Dekker, 1987. ISBN 0-8247-2476-3
- [22] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, *NIST-JANAF Thermochemical Tables* [sitio web], [consultado del 10 al 26 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://kinetics.nist.gov/janaf/>
- [23] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, *Búsqueda de datos de especies por Fórmula Química* [sitio web], [consultado del 10 al 26 de marzo de 2016]. Disponible en: <http://webbook.nist.gov/chemistry/form-ser.html>

[24] ELVERS, B., HAWKINS, S., RAVENSCROFT, M., SCHULZ, G. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Volumen A13, 5ª edición, Weinheim (Alemania): VCH, 1989. ISBN 3-527-20113-0

[25] LATHAM, D. A., MCAULEY, K. B., PEPPLEY, B. A., RAYBOLD, T. M. Mathematical modeling of industrial steam-methane reformer for on-line deployment. *Fuel Processing Technology*, 2011, volumen 92, 1574-1586. ISSN 0378-3820

[26] KUBOTA METAL CORPORATION, *Alloy data sheet HK*, Orillia (Canadá): Kubota Metal Corporation, 1991.

Parte B. Columna de absorción con reacción química C-301

Planta de Producción de Hidrógeno por

Reformado de Gas Natural

INDICE PARTE B

1. INTRODUCCIÓN	60
2. ELECCIÓN ENTRE PLATOS O RELLENO	60
2.1 Selección del tipo de relleno	61
3. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	64
3.1 Desarrollo teórico para la obtención de las expresiones para el cálculo de la altura	65
3.2 Planteamiento del algoritmo para el cálculo de la altura del absorbedor	68
3.3 Balance de materia y energía entre las diferentes secciones de la columna.....	69
3.4 Cálculo del diámetro de la columna.....	71
3.5 Cálculo de la constante cinética de segundo orden, las difusividades, k_L , k_G y la constante de Henry a diferentes temperaturas	74
3.5.1 Cálculo de la constante cinética de segundo orden.....	74
3.5.2 Cálculo de las diferentes difusividades.....	74
3.5.3 Cálculo del coeficiente de transferencia de materia en la fase líquida	75
3.5.4 Cálculo del coeficiente de transferencia de materia en la fase gaseosa	76
3.5.5 Cálculo de la constante de Henry.....	76
3.6 Cálculo del parámetro β	77
3.7 Comprobaciones.....	79
3.8 Cálculo de la altura de cada sección y cálculo de la altura total del relleno	80
3.9 Cálculo de la caída de presión.....	80
3.10 Accesorios internos de la columna.....	81
3.11 Consideraciones generales del diseño mecánico de recipientes a presión	81
3.11.1 Presión de diseño	82
3.11.2 Temperatura de diseño.....	82
3.11.3 Materiales	82

3.11.4	Esfuerzo máximo permisible	84
3.11.5	Eficiencia de la unión soldada	85
3.11.6	Diámetro del equipo.....	85
3.12	Cálculo de los espesores de pared	85
3.13	Selección de los cabezales y cálculo de su espesor.....	86
3.14	Cálculo de la altura total de la columna	88
4.	COLUMNA DE ABSORCIÓN C-301	88
4.1	Introducción	88
4.2	Balance de materia y energía entre las diferentes secciones de la columna.....	90
4.3	Diámetro de la columna	93
4.4	Cálculo de la constante cinética de segundo orden, k_2	94
4.5	Cálculo de las difusividades.....	95
4.6	Cálculo del coeficiente de transferencia de materia en la fase líquida.....	97
4.7	Cálculo de la constante de Henry	98
4.8	Cálculo de la altura de la sección inferior de la columna.....	99
4.9	Cálculo de la altura de la sección intermedia de la columna.....	101
4.10	Cálculo de la altura de la sección superior de la columna.....	104
4.11	Cálculo de la altura total del relleno.....	107
4.12	Cálculo de la caída de presión.....	107
4.13	Diseño mecánico	108
4.13.1	Accesorios internos de la columna	108
4.13.2	Espesores de carcasa y cabezales.....	109
4.14	Cálculo de la altura total de la columna	109
5.	BIBLIOGRAFÍA	111

1. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes tecnologías para recuperar CO_2 de una corriente gaseosa, pero la absorción con aminas es una de las más empleadas en aquellos procesos en los que se trabaja con gas de síntesis (N_2 , H_2 , CO_2 y CO), como en la producción de amoníaco o en procesos de producción de H_2 , como el que se plantea en el presente trabajo. [1]

La absorción es una operación unitaria utilizada en la industria química para separar determinados gases de una mezcla gaseosa poniéndolos en contacto con un disolvente líquido. En algunos procesos el sistema se limita a una absorción física, mientras que en otros la absorción va acompañada de reacciones químicas en la fase líquida, como en el proceso de absorción de CO_2 con aminas. [2]

En la absorción con reacción química los fenómenos que rigen el proceso se vuelven más complejos, dado que el soluto ya no solo difunde a través de una película líquida en función del gradiente de concentraciones, sino que, al mismo tiempo, reacciona con el líquido a una velocidad dependiente de las concentraciones de gas (CO_2) y de reactivo en la fase líquida (amina). Por lo tanto será necesario incluir en la ley de Fick de difusión algún término que tenga en cuenta la influencia de la reacción química. Los resultados muestran que en la práctica la transferencia de materia es mayor que en los sistemas sin reacción química, por lo tanto el efecto de la reacción que tiene lugar en la fase líquida se suele expresar como un factor de mejora (E, del inglés *enhancement*). [2]

Debido a esto y otra serie de consideraciones los procedimientos que se emplean para el diseño de este tipo de columnas difieren del método tradicional para absorción física, como se verá en los siguientes apartados.

Por otra parte, al igual que en la absorción física, es necesario escoger entre columnas de relleno o de platos, y una vez decidido esto, el tipo de relleno o de plato.

2. ELECCIÓN ENTRE PLATOS O RELLENO

La elección entre estos dos tipos de tecnologías para una aplicación determinada sólo se puede hacer de forma rigurosa calculando el coste de cada alternativa. Sin embargo, la elección generalmente se puede realizar en base a la experiencia, mediante criterios empíricos, considerando las ventajas y desventajas principales de cada tipo.

- Una columna de platos es capaz de manejar un intervalo más amplio de caudales que una columna de relleno.
- Las columnas de relleno no son adecuadas para caudales de líquido muy bajos.
- La eficacia de un plato se puede predecir de forma más precisa que el término equivalente para el relleno.
- El diseño de las columnas de platos es más riguroso que las de relleno.
- Es más fácil refrigerar una columna de platos.
- Es más fácil realizar extracciones laterales en columnas de platos.
- En cuanto al mantenimiento relacionado con las operaciones de limpieza, si el líquido provoca incrustaciones, o contiene sólidos, es más fácil cubrir las necesidades para realizar la limpieza en una columna de platos, ofrecen la ventaja de poder instalar bocas de hombre.
- El líquido retenido es apreciablemente menor en una columna de relleno que en una columna de platos. Esto puede ser importante cuando se debe minimizar el inventario de líquidos inflamables o tóxicos por razones de seguridad.
- Cuando se manejan sustancias corrosivas se recomienda el uso de relleno, darán lugar a diseños más económicos que su equivalente en columnas de platos.
- En sistemas que tiendan a formar espumas será más adecuado el uso de columnas de relleno.
- La caída de presión por etapa de equilibrio puede ser mayor para platos que para relleno, a causa del líquido retenido en las bandejas.
- En columnas que operan a vacío será más adecuado el uso de columnas de relleno, dado que posibilitan estructuras más compactas.
- Siempre se debería de considerar relleno para columnas de diámetro pequeño, menor a 0,6 m, donde los platos serían difíciles y caros de instalar.

En base a estos criterios empíricos, se decide instalar una columna de relleno, dado que se manejan productos corrosivos, tanto la disolución de monoetanolamina, como el producto de la absorción del CO_2 , que es un gas ácido. Además, en principio, se consiguen caídas de presión más bajas. Por otra parte no es necesario instalar refrigeraciones intermedias en la columna para el mantenimiento de la operación, ni realizar extracciones laterales, aspectos que favorecerían la elección de una columna de platos. [3]

2.1 Selección del tipo de relleno

Todo relleno debe de cumplir una serie de características básicas como son:

- Proporcionar un área interfacial elevada entre las fases líquida y gaseosa, presentar una superficie específica grande.
- Presentar una estructura abierta, que oponga baja resistencia a la circulación del gas.
- Promover la distribución uniforme del líquido a lo largo del relleno, así como una circulación uniforme de la fase gaseosa transversalmente a través de la columna.

Existen muchos tipos y formas diversas de relleno para satisfacer estos requisitos, divididos generalmente entre: rellenos con una geometría regular (anillos apilados, mallas y rellenos estructurados patentados) y rellenos aleatorios (anillos, sillas y formas patentadas que se vuelcan dentro de la columna y quedan distribuidos aleatoriamente). Las mallas presentan una estructura más abierta y se usan para velocidades elevadas del gas, donde una caída de presión baja es esencial; por ejemplo, en torres de refrigeración. Por otra parte, los rellenos aleatorios son usados comúnmente en la industria de procesos, en la Figura B.1 se pueden ver algunos de ellos. [3]

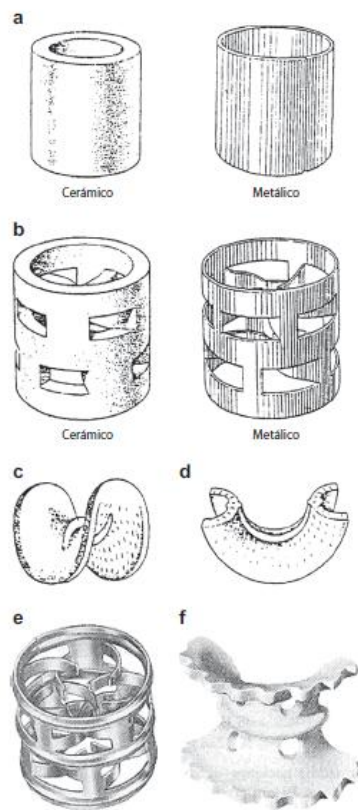


Figura B.1. Rellenos aleatorios típicos. a) Anillos Raschig. b) Anillos Pall. c) Silla cerámica Berl. d) Silla cerámica INTALOX®. e) HY-PAK® metálico. f) SUPER INTALOX® metálico. Fuente: [3]

Para el absorbedor con reacción química del presente proyecto se decide instalar un relleno aleatorio de anillos Raschig. [1]

Este tipo de anillos son uno de modelos de relleno aleatorio más antiguos, y aún tienen un uso extendido.

En cuanto al material del relleno, dependerá de la naturaleza de los fluidos y de la temperatura de operación de la columna. De este modo, los rellenos cerámicos serán la opción preferible para los líquidos corrosivos, pero no se recomiendan para productos alcalinos fuertes. Los rellenos plásticos son atacados por algunos disolventes orgánicos y sólo se pueden utilizar a temperaturas moderadas. Y, por otra parte, los rellenos metálicos se recomiendan, de forma general, cuando la operación de la columna es probable que sea inestable, dado que son más resistentes que los rellenos cerámicos estándar, que se romperían fácilmente. [3]

Por lo tanto, para el presente absorbedor se debe utilizar relleno cerámico, resistente a la corrosión que, como se dijo anteriormente, presentan las sustancias con las que trabaja el sistema.

En cuanto al tamaño de los anillos, el tamaño generalizado es en torno a 50 mm, teniendo en cuenta que: un tamaño mayor presenta un menor coste por metro cúbico, pero no suele compensar debido a la menor eficacia en la transferencia de materia; y por otra parte, un tamaño más pequeño, es más caro, pero da lugar a mejores eficiencias de transferencia de materia. [3]

La variación de la eficiencia con el tamaño del relleno, para diferentes tipos de relleno aleatorio, se puede ver gráficamente en la Figura B.2.

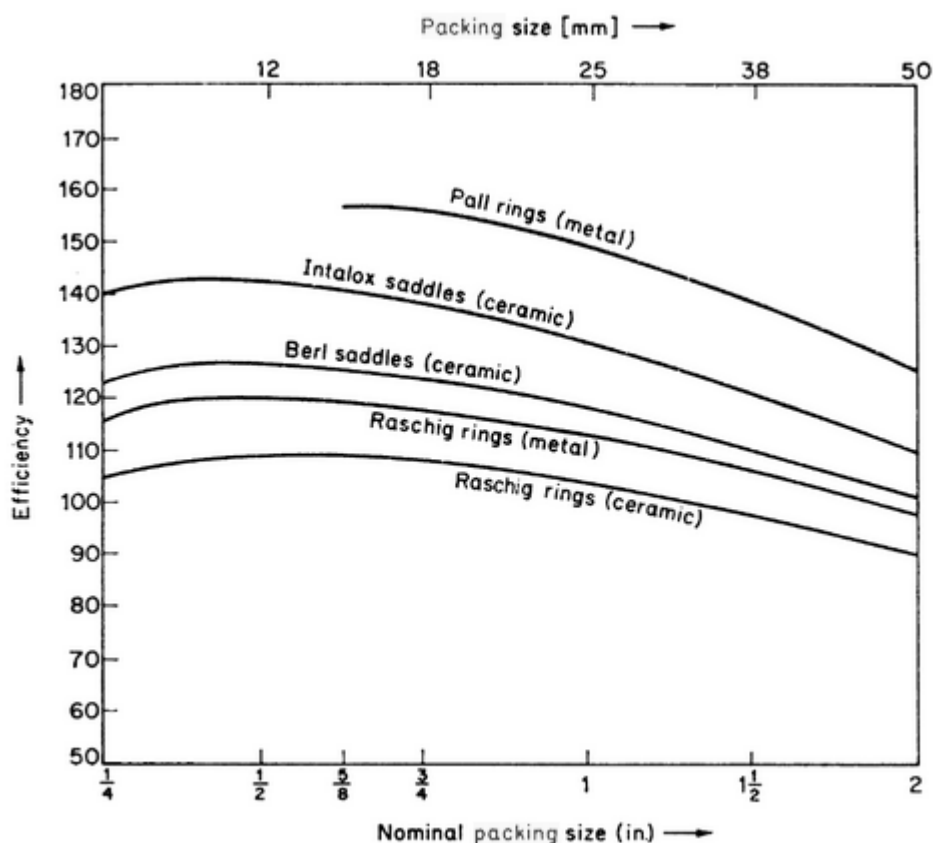


Figura B.2. Eficiencia de diferentes tipos y tamaños de rellenos aleatorios. Fuente: [4]

En este caso se opta por anillos de 1½ in, de acuerdo con lo recomendado por Prakash D. V. y Vijaykumar V. M. [1]

Por lo tanto, en resumen, se emplearán anillos Raschig cerámicos de 1½ in, resistentes a la corrosión, más baratos que otro tipo de relleno, aunque presentando una eficiencia menor que, no obstante, se considera suficiente.

3. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

El procedimiento para el diseño del absorbedor de CO₂ del presente trabajo se basa en el método propuesto por Prakash D. V. y Vijaykumar V. M. [1], un modelo integral para determinar la altura del relleno en un absorbedor de CO₂ en aminas con reacción química.

El método consiste en calcular la altura de diferentes secciones de la columna, para las cuales se produzca una variación pequeña en la fracción molar de CO₂, comenzando por la parte

inferior, hasta alcanzar la fracción molar objetivo en la corriente gaseosa de salida. De este modo, con la suma de la altura de todas las secciones se obtiene la altura total.

El absorbedor se considera adiabático, la fase líquida y la gaseosa fluyen en contracorriente en flujo en pistón a través de un relleno que, como se ha visto, es de anillos Raschig cerámicos de 1½ pulgadas, capaces de resistir la corrosión propia de la monoetanolamina (MEA) y de dicha disolución con el CO₂ absorbido. Inicialmente se considera para su dimensionamiento que el equipo es isobárico, dado que la caída de presión tiene un efecto generalmente despreciable (los diferentes parámetros que se consideran para el diseño del absorbedor no se ven influenciados significativamente ante pequeñas variaciones en la presión), pero también se procederá al cálculo de la misma posteriormente.

La reacción que tiene lugar tras la absorción del CO₂ en una disolución de MEA 2,5 M, bajo condiciones de operación industriales como las que aquí se consideran, presenta un comportamiento de primer orden respecto al CO₂ y también de primer orden respecto a la amina. Haciendo que en conjunto la reacción (R 3.1) sea de segundo orden. [5]



En cuanto a la transferencia de calor se hacen algunas consideraciones. La reacción del CO₂ y la monoetanolamina es exotérmica, produciendo generalmente, a nivel industrial, un aumento de unos 20°C en la temperatura del líquido. La temperatura aumenta a medida que se desciende por la columna. Por lo tanto, además del balance de materia necesario para determinar las principales dimensiones del absorbedor, es imprescindible realizar el balance de energía. El calor generado en la fase líquida debido a la reacción química se disipa por tres vías: por transmisión de calor de la fase líquida a la gaseosa, vaporización de parte del absorbente y pérdida de calor a los alrededores. No obstante, principalmente, la energía generada con la reacción química se emplea en aumentar la temperatura de la fase líquida, con lo que la influencia de los otros medios de transmisión de calor es despreciable para el cálculo del absorbedor. [1]

3.1 Desarrollo teórico para la obtención de las expresiones para el cálculo de la altura

Las expresiones que permiten obtener la altura para cada sección se obtienen como se explica a continuación.

A partir de un balance de materia al CO_2 sobre un elemento diferencial de altura (dZ), la altura del relleno de una sección vendría dado por:

$$Z = \int_{y_2}^{y_1} \frac{G_s}{R a \cdot S} \cdot \frac{dy_A}{(1 - y_A)^2} \quad (3.1)$$

Donde:

Z: es la altura del relleno (m)

G_s : es el caudal molar de inertes (kmol/s)

$R a$: es la tasa volumétrica de absorción (kmol/m³·s)

S: es el área de la sección transversal de la columna (m²)

y_1 : es la fracción molar de CO_2 en la fase gaseosa en la parte inferior del volumen de control

y_2 : es la fracción molar de CO_2 en la fase gaseosa en la parte superior del volumen de control

y_A : es la fracción molar de CO_2 en la fase gaseosa

La tasa volumétrica de absorción puede expresarse como:

$$R a = k_G \cdot a \cdot (P_{AG} - P_{Ai}) \quad (3.2)$$

$$R a = k_L \cdot a \cdot [(A_i^*) - (A_0)] \cdot E = k_L \cdot a \cdot H \cdot [P_{Ai} - P_{A0}] \cdot E \quad (3.3)$$

Donde:

$R a$: es la tasa volumétrica de absorción (kmol/m³·s)

k_G : es el coeficiente de transferencia de materia en la fase gaseosa (kmol/m²·s·kPa)

k_L : es el coeficiente de transferencia de materia en la fase líquida (m/s)

a : es la superficie de contacto gas líquido proporcionada por el tipo de relleno (m²/m³)

P_{AG} : es la presión parcial de CO_2 en la fase gaseosa (kPa)

P_{Ai} : es la presión parcial de CO_2 en la interfase líquido-gas (kPa)

P_{A0} : es la presión de equilibrio del CO_2 (kPa)

A_i^* : es la concentración de CO_2 en la interfase liquido-gas en equilibrio con el líquido (kmol/m^3)

A_0 : es la concentración de CO_2 en la fase líquida (kmol/m^3)

E : es el factor de mejora debido a la reacción química

H : es la constante de Henry ($\text{kmol/m}^3 \cdot \text{kPa}$)

A partir de las ecuaciones 3.2 y 3.3, eliminando A_i^* , que es desconocido, se tiene que:

$$R a = \frac{(P_{AG} - P_{A0})}{\left(\frac{1}{k_G a} + \frac{1}{k_L a \cdot H \cdot E} \right)} \quad (3.4)$$

Donde, de acuerdo con la ley de Dalton, o ley de las presiones parciales:

$$(P_{AG} - P_{A0}) = P_T \cdot (y_A - y_{A0}) \quad (3.5)$$

Donde:

P_T : es la presión total (kPa)

y_{A0} : es la fracción molar de CO_2 en la fase líquida

Pudiéndose definir el parámetro β (en $\text{kmol/s} \cdot \text{kPa} \cdot \text{m}^2$) mediante la siguiente expresión:

$$\beta = \left(\frac{1}{k_G} + \frac{1}{k_L \cdot H \cdot E} \right)^{-1} \quad (3.6)$$

Con lo que, sustituyendo en la ecuación 3.4, se tiene:

$$R a = \beta \cdot a \cdot P_T \cdot (y_A - y_{A0}) \quad (3.7)$$

En el caso de la absorción física el valor de β permanece prácticamente constante a lo largo de la columna. Sin embargo en el caso en el que la absorción viene acompañada de reacción química, como en este caso, no permanece constante de modo general.

Sustituyendo la ecuación 3.7 en la ecuación 3.1 se tiene que:

$$Z = \frac{G_s}{S \cdot a \cdot P_T} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy_A}{\beta \cdot (y_A - y_{A0}) \cdot (1 - y_A)^2} \quad (3.8)$$

La ecuación 3.8 es la expresión general para el cálculo de la altura del relleno.

En la parte baja de la columna, la fracción molar de CO_2 en la fase gaseosa (y_A) es tan elevada que la diferencia ($y_A - y_{A0}$) es prácticamente igual a y_A . Con lo que el efecto de la reacción reversible es despreciable, se puede decir que en estas condiciones la reacción es “pseudo irreversible”. Si además se considera que la altura o el volumen de control bajo estudio se toma de tal modo que las variaciones que se produzcan en las diferentes propiedades, y en definitiva en β , son pequeñas, se puede considerar un valor medio para dicho parámetro, pasando a ser constante para el volumen de control considerado. Bajo estas consideraciones la ecuación 3.8 quedaría:

$$Z = \frac{G_s}{S \cdot a \cdot P_T \cdot \beta} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy_A}{(1 - y_A)^2} \quad (3.9)$$

Esta expresión se podrá utilizar por tanto cuando las anteriores consideraciones se cumplan y de forma genérica en la parte baja de la columna.

Por otra parte, en la zona superior de la columna, las condiciones de operación son diferentes. La fracción molar de CO_2 en la fase líquida (y_{A0}) ya no toma un valor despreciable frente a la fracción molar de CO_2 en la fase gaseosa (y_A), dado que esta última es ya muy baja y la disolución de MEA no retorna al absorbedor completamente libre de CO_2 . Por lo tanto y_{A0} pasa a tener un valor significativo y es necesario considerar la naturaleza reversible de la reacción.

Por lo tanto, de forma general, para la sección superior de la columna, considerando nuevamente que la altura de la sección es tal que las variaciones que se produzcan en el valor de β no son significativas, se usará la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{G_s}{S \cdot a \cdot P_T \cdot \beta} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy_A}{(y_A - y_{A0}) \cdot (1 - y_A)^2} \quad (3.10)$$

La ecuación 3.10 se usará también cuando no se cumplan las consideraciones necesarias para emplear la ecuación 3.9, como se especifica a continuación en el algoritmo de la Figura C.3.

3.2 Planteamiento del algoritmo para el cálculo de la altura del absorbedor

El algoritmo para el cálculo de la altura del absorbedor con reacción química que se plantea en el presente trabajo se muestra en la Figura B.3. Consiste en una representación esquemática el procedimiento de cálculo a seguir. Dicho algoritmo, así como los diferentes parámetros que en él aparecen, se procederán a desarrollar en los apartados sucesivos.

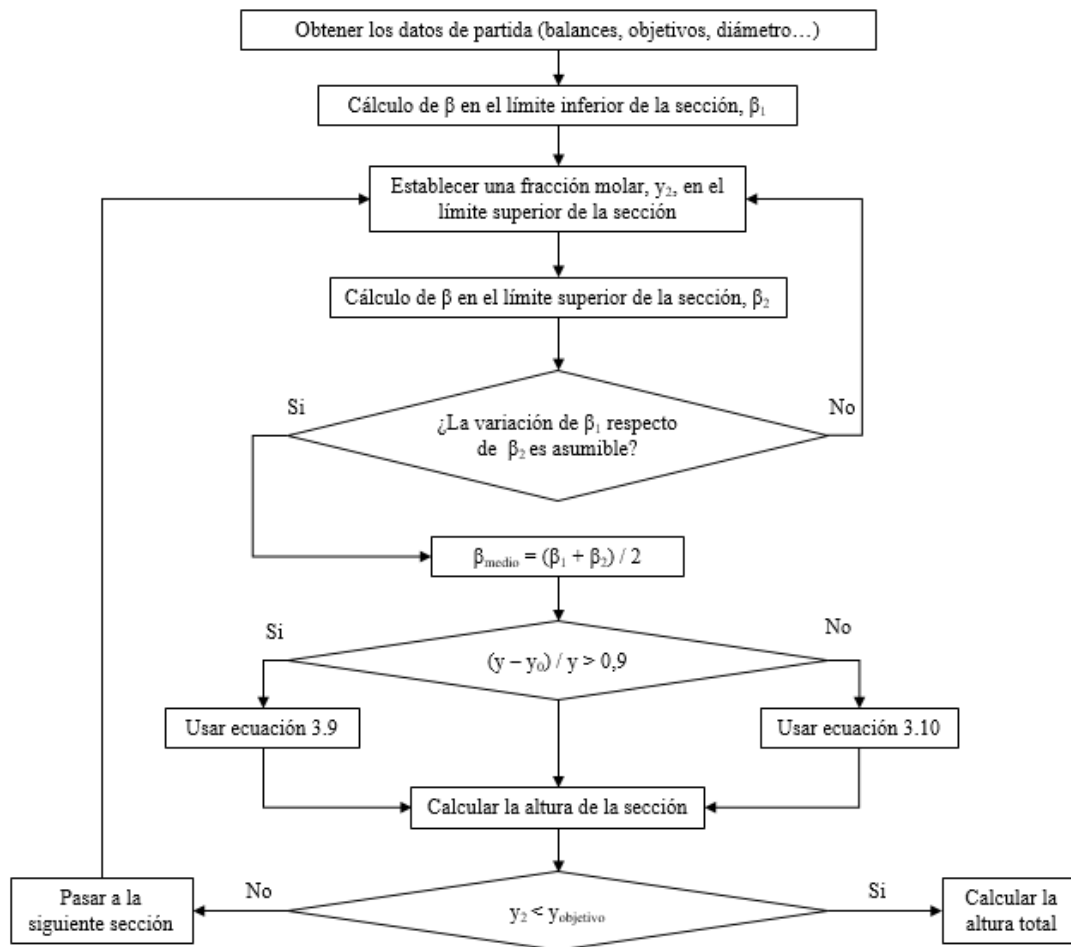


Figura B.3. Algoritmo propuesto para el cálculo de la altura del absorbedor. Adaptado de [1]

Sin embargo, el primer paso antes de proceder a la aplicación del algoritmo propiamente dicho es conocer las condiciones de operación y composiciones en el interior de la columna en diferentes puntos, así como el diámetro de la torre.

3.3 Balance de materia y energía entre las diferentes secciones de la columna

Conocidos los caudales, las composiciones y las temperaturas de las corrientes de entrada, así como la fracción molar de CO_2 objetivo para la corriente gaseosa de salida, se pasa a calcular las diferentes composiciones y temperaturas de entrada y salida a las diferentes secciones en las que se dividirá la columna para el cálculo de la altura. Para ello se plantean los diferentes balances de materia y energía necesarios. De modo que:

$$\text{Entada} - \text{Salida} + \text{Generación} = \text{Acumulación} \quad (3.11)$$

Se consideran inicialmente tres secciones diferentes, como propone el artículo de Prakash D. V. y Vijaykumar V. M. [1], entre las siguientes fracciones molares:

- Sección inferior: Desde la fracción molar de entrada hasta 0,07.
- Sección intermedia: Desde 0,07 a 0,03.
- Sección superior: Desde 0,03 a la fracción molar de salida.

No obstante, se considerará la idoneidad de esta división para satisfacer las condiciones necesarias para aplicar el método, es decir, como se indica también en el algoritmo de diseño, que las variaciones de la fracción molar sean lo suficientemente pequeñas como para que no se produzcan variaciones importantes en el parámetro β .

En cuanto al balance de energía, haciendo las consideraciones descritas anteriormente, al inicio del apartado 3, se empleará de modo general la siguiente expresión:

$$m_{CO_2} \cdot \Delta H_r = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3.12)$$

Donde:

m_{CO_2} : es el flujo másico de CO_2 que reacciona (kg/h)

ΔH_r : es el calor de reacción para la absorción de CO_2 en MEA por kilo de CO_2 (kcal/kg)

m : es el flujo másico de la fase líquida absorbente (kg/h)

C_p : es el calor específico de la fase líquida absorbente (kcal/kg·°C)

ΔT : es la diferencia entre las temperaturas de entrada y salida (°C)

El calor de reacción se obtiene de la Tabla B.1:

Tabla B.1. Calores de reacción para diferentes disoluciones de aminas a las condiciones de operación.
Fuente: [1]

Alcanolamina	Calor de reacción exotérmico (kcal/kg)
MEA	454,5
DEA	359,7
TEA	347,1
DGA	468,3

La C_p se obtiene mediante la gráfica de la Figura B.4:

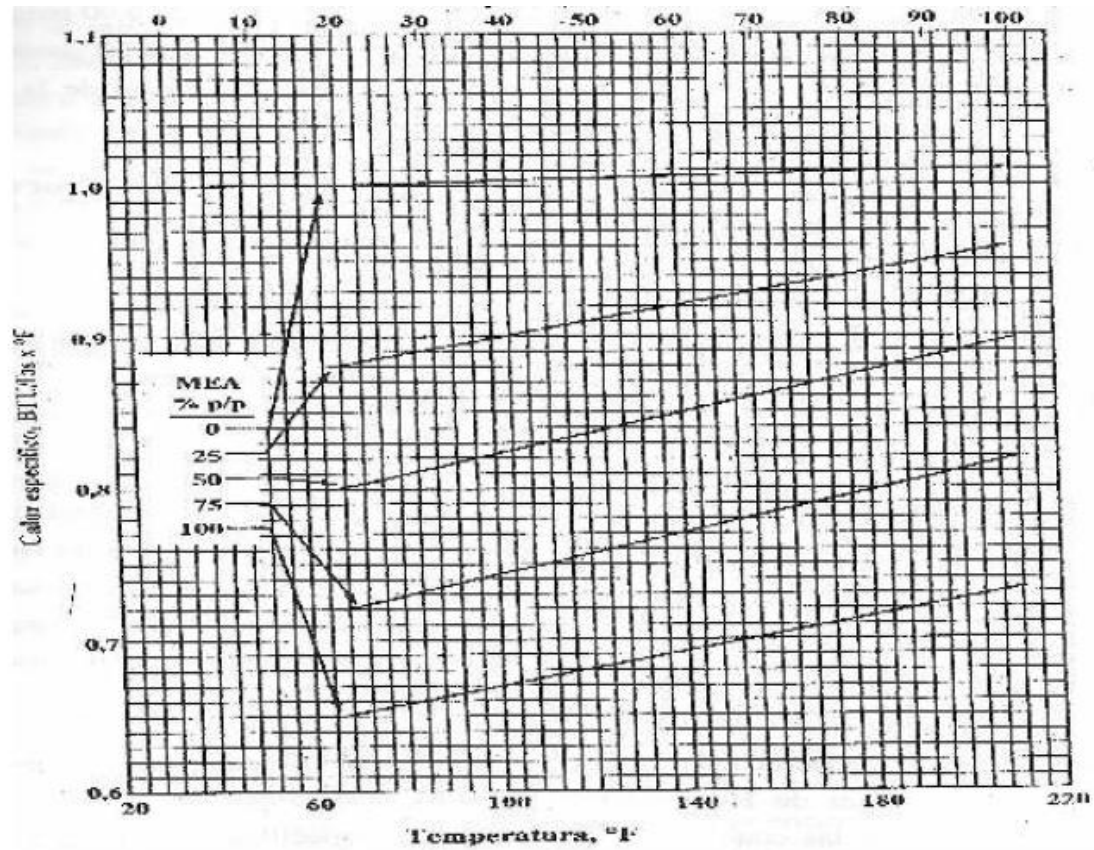


Figura B.4. Variación de la C_p con la temperatura para disoluciones de MEA de diferentes % en peso
Fuente: [6]

3.4 Cálculo del diámetro de la columna

El diámetro de la columna de absorción se obtiene mediante la gráfica de lobo (Figura B.5) y estableciendo unas condiciones de inundación.

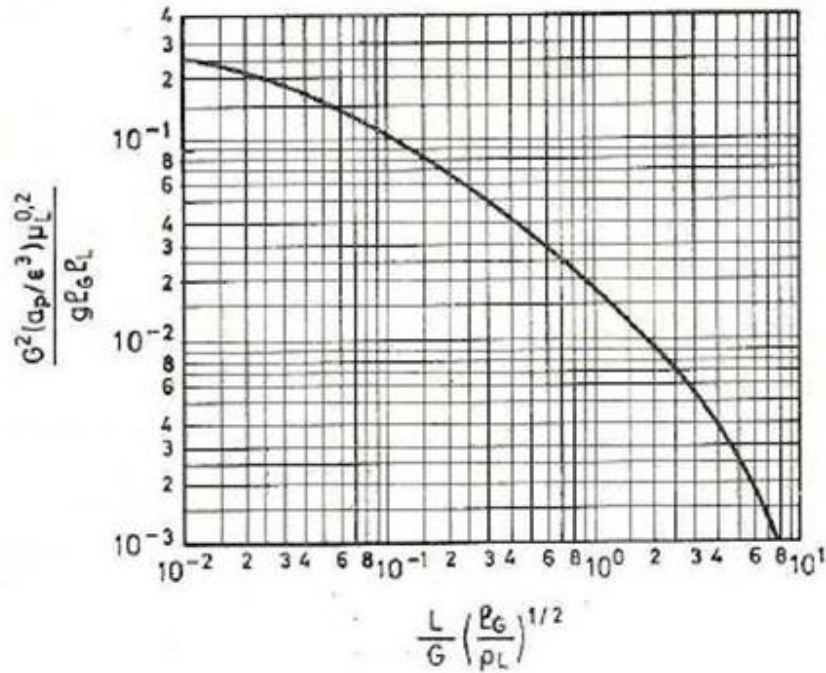


Figura B.5. Gráfica de lobo. Fuente: [4]

De modo que una vez conocido el valor del parámetro de flujo, $F_{LV} = \frac{L}{G} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/2}$, se puede despejar de $\frac{G'^2(a/\varepsilon^3)\mu_L^{0.2}}{g \cdot \rho_G \cdot \rho_L}$ el valor de la velocidad másica de la fase gaseosa en condiciones de inundación.

Donde:

L: es el flujo másico de la fase líquida (kg/h)

G: es el flujo másico de la fase gaseosa (kg/h)

ρ_G : es la densidad de la fase gaseosa (kg/m³)

ρ_L : es la densidad de la fase líquida (kg/m³)

G': es la velocidad másica de la fase gaseosa en condiciones de inundación (kg/h·m²)

a: es la superficie de contacto gas líquido proporcionada por el tipo de relleno (m²/m³)

ε : es la fracción hueca característica del relleno

μ_L : es la viscosidad de la fase líquida (cp)

g: es la aceleración de la gravedad (m/h²)

F_{LV} : es el parámetro de flujo

De forma que el área de la sección transversal de la columna se puede obtener mediante:

$$A = \frac{G}{G' \cdot \%inundación} \quad (3.13)$$

A partir de lo cual, considerando una sección circular, se puede calcular el diámetro de la columna.

Los valores para la superficie específica y la fracción hueca características del relleno se pueden obtener de la Tabla B.2.

Tabla B.2. Características de los rellenos estructurados. Fuente: [7]

Name	Material	Nominal size		Wall thickness, mm	Bed weight, kg/m ³	Area, m ² /m ³	% voids	Packing factor F_p , m ⁻¹	Dry packing factor F_{pd} , m ⁻¹	Vendor
		mm	Number							
Raschig rings	C	6	—	1.6	960	710	62	—	5250	Various
		13	—	2.4	880	370	64	1900	1705	
		25	—	3.2	670	190	74	587	492	
		50	—	6.4	660	92	74	213	230	
		75	—	9.5	590	62	75	121	—	
Raschig rings	M	19	—	1.6	1500	245	80	984	—	Various
		25	—	1.6	1140	185	86	472	492	
		50	—	1.6	590	95	92	187	223	
		75	—	1.6	400	66	95	105	—	
Pall rings	M	16	—	0.40	—	92	92	296	262	Norton, Koch, Clitsch
		25	—	0.51	480	205	94	183	174	
		38	—	0.64	415	130	95	131	91	
		50	—	0.81	385	115	96	89	79	
		90	—	—	270	92	97	59	46	
Cascade mini rings (CMR)	M	—	1	—	389	250	96	131	102	Clitsch
		—	1.5	—	234	144	97	95	—	
		—	2.5	—	195	123	98	72	79	
		—	3	—	58	103	98	46	43	
		—	1A	—	71	185	94	98	92	
Berl saddles	C	—	3A	—	40	74	96	39	33	Koch
		6	—	—	900	900	60	—	2950	
		13	—	—	865	465	62	790	900	
		25	—	—	720	250	68	560	308	
		38	—	—	640	150	71	215	154	
Intalox saddles	C	50	—	—	625	105	72	150	102	Norton
		6	—	—	864	984	65	302	2720	
		13	—	—	736	623	71	—	613	
		25	—	—	672	256	73	302	208	
		50	—	—	608	118	76	131	121	
Fleximax	M	75	—	—	576	92	79	72	66	Koch
		—	300	—	—	141	98	85	—	
		—	400	—	—	85	98	56	—	
		25	—	—	332	230	97	134	141	
		40	—	—	237	154	97	79	85	
Metal Intalox (IMTP)	M	50	—	—	150	98	98	59	56	Norton
		70	—	—	130	56	98	39	—	
		—	1	0.30	178	168	98	98	89	
		—	2	0.45	173	96	98	59	56	
		—	2.5	0.45	145	83	66	52	49	
Nutter rings	M	—	3.0	0.50	133	66	98	43	36	Nutter
		25	—	—	80	206	90	180	180	
		50	—	—	61	102	92	85	82	
		90	—	—	53	85	92	56	39	
		25	—	—	—	—	—	351	—	
Pall rings	C	38	—	—	—	—	—	180	—	Norton
		50	—	—	—	—	—	141	—	
		25	—	—	—	—	—	—	—	
		38	—	—	—	—	—	—	—	
		50	—	—	—	—	—	—	—	
Intalox saddles	P	—	1	—	96	207	90	131	131	Norton
		—	2	—	56	108	93	92	85	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
Snowflake	P	—	—	—	45	92	98	43	—	Norton
		25	1	—	72	180	92	82	—	
		38	1.5	—	61	144	93	56	—	
		50	2.0	—	53	102	94	39	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
Tri-Pack	P	25	1	—	72	180	92	82	—	Jaeger
		50	2	—	53	102	94	39	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
VSP	M	25	1	—	332	206	98	105	—	Jaeger
		50	2	—	296	112	96	69	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
Tellerettes	P	25	1	—	112	180	87	—	—	Cellicote
		50	2	—	59	125	93	—	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	
		—	—	—	—	—	—	—	—	

NOTES: M = metal, carbon steel. Other metals available.

P = plastic, polypropylene. Other plastics available.

3.5 Cálculo de la constante cinética de segundo orden, las difusividades, k_L , k_G y la constante de Henry a diferentes temperaturas

Para poder calcular los parámetros recogidos en el algoritmo de la Figura B.3 es necesario conocer estas propiedades características del sistema.

3.5.1 Cálculo de la constante cinética de segundo orden

La constante cinética de segundo orden para el sistema CO₂-MEA, en función de la temperatura, se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$\log_{10} k_2 = 11,069 - \left(\frac{2142,34}{T} \right) \quad (3.14)$$

Donde:

k_2 : es la constante cinética para la reacción CO₂-MEA (m³/kmol·s)

T : es la temperatura de la fase líquida (K)

3.5.2 Cálculo de las diferentes difusividades

La difusividad es una propiedad que relaciona el flujo de materia con el gradiente de concentración de un material en un sistema determinado, de acuerdo con la Ley de Fick:

$$J = -D \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad (3.15)$$

Donde:

J : es el flujo de materia [masa/longitud²·tiempo]

D : es la difusividad [longitud/tiempo]

$\partial C / \partial x_i$: es el gradiente de concentración en la dirección x_i [(masa/longitud³)/longitud]

La difusividad del CO₂ en agua, en función de la temperatura se puede obtener mediante la expresión:

$$D_{CO_2, H_2O} = 2,35 \cdot 10^{-6} \cdot \exp\left(\frac{-2119}{T}\right) \quad (3.16)$$

La difusividad de la monoetanolamina en una disolución de MEA 2,5 M se considera igual a la difusividad del CO₂ en el agua. De modo que:

$$D_B = D_{CO_2, H_2O} \quad (3.17)$$

Donde:

D_{CO_2, H_2O} : es la difusividad del CO₂ en agua (m²/s)

D_B : es la difusividad de MEA en una disolución de MEA 2,5 M (m²/s)

T: es la temperatura de la fase líquida (K)

La difusividad del CO₂ en la disolución de MEA 2,5 M se puede obtener a partir de la difusividad del CO₂ en agua. Se sabe que la difusividad en la disolución de MEA 2,5 M respecto al agua pura toma un valor de 0,64 a 25 °C y se mantiene constante a lo largo de la columna. Por lo que se puede decir que:

$$D_A = 0,64 \cdot D_{CO_2, H_2O} \quad (3.18)$$

Donde:

D_A : es la difusividad del CO₂ una disolución de MEA 2,5 M (m²/s)

D_{CO_2, H_2O} : es la difusividad del CO₂ en agua (m²/s)

3.5.3 Cálculo del coeficiente de transferencia de materia en la fase líquida

Se puede obtener, en función de la temperatura, conociendo que el coeficiente de transferencia de materia en la fase líquida toma un valor de $2,4 \cdot 10^{-4}$ m/s a una temperatura de 30 °C, y sabiendo que es directamente proporcional a la raíz de la difusividad del CO₂ en la disolución de MEA 2,5 M (que depende de la temperatura). Es decir:

$$k_L = s \cdot \sqrt{D_A} \quad (3.19)$$

Donde:

k_L : es el coeficiente de transferencia de materia en la fase líquida (m/s)

s: es la constante de proporcionalidad

D_A : es la difusividad del CO_2 una disolución de MEA 2,5 M (m^2/s)

3.5.4 Cálculo del coeficiente de transferencia de materia en la fase gaseosa

Este coeficiente se puede calcular de manera específica para cada situación en función de la tasa de flujo másico de la fase gaseosa mediante la siguiente expresión:

$$k_G a = 6,84 \cdot 10^{-6} - \left(\frac{G'}{360} \right)^{0,72} \quad (3.20)$$

Donde:

G' : es la velocidad másica de la fase gaseosa ($\text{kg}/\text{h} \cdot \text{ft}^2$)

k_G : es el coeficiente de transferencia de materia en la fase gaseosa ($\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa}$)

a : es la superficie de contacto gas líquido proporcionada por el tipo de relleno (m^2/m^3)

3.5.5 Cálculo de la constante de Henry

La constante de Henry es indicativo de la concentración que alcanza un gas en un disolvente, a una determinada temperatura y presión parcial.

Para el cálculo de la constante se considera lo siguiente:

- La fuerza iónica varía de 0,375 a 1 g ion/L.
- Esto hace variar la relación de la constante para la disolución de MEA 2,5 M respecto a la constante para agua pura de 0,94 a 0,85.
- Tomando un valor medio para esta relación de 0,895, y calculando la constante de Henry para agua pura mediante la expresión:

$$H_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}} = 3,54 \cdot 10^{-7} \cdot \exp\left(\frac{2044}{T}\right) \quad (3.21)$$

Se tiene que la constante de Henry para el sistema se obtiene mediante:

$$H = 0,895 \cdot H_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}} \quad (3.22)$$

Donde:

$H_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}}$: es la constante de Henry para el CO_2 en agua ($\text{kmol/m}^3 \cdot \text{kPa}$)

H : es la constante de Henry para el CO_2 en la disolución de MEA 2,5M ($\text{kmol/m}^3 \cdot \text{kPa}$)

T : es la temperatura de la fase líquida (K)

3.6 Cálculo del parámetro β

El parámetro β recoge la influencia de diferentes parámetros y, como se ha visto, se obtiene mediante la ecuación 3.6:

$$\beta = \left(\frac{1}{k_G} + \frac{1}{k_L \cdot H \cdot E} \right)^{-1} \quad (3.6)$$

Donde:

k_G : es el coeficiente de transferencia de materia en la fase gaseosa ($\text{kmol/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa}$)

k_L : es el coeficiente de transferencia de materia en la fase líquida (m/s)

E : es el factor de mejora debido a la reacción química

H : es la constante de Henry ($\text{kmol/m}^3 \cdot \text{kPa}$)

β : es el parámetro de la ecuación 3.6 ($\text{kmol/s} \cdot \text{kPa} \cdot \text{m}^2$)

De modo general, se calcularán dos valores de β para cada tramo de columna considerado, uno en el límite superior y otro en el límite inferior.

Para lo cual el factor de mejora E , se obtiene en función de los criterios mostrados en la Tabla B.3.

Tabla B.3. Factor de mejora E bajo diferentes condiciones. Fuente: [1]

Número de caso	\sqrt{M}	E
1	$\sqrt{M} = 1$ ó $\sqrt{M} < 1$ y $\sqrt{M} \ll q$	$\sqrt{(M+1)}$
2	$3 \ll \sqrt{M} \ll q$	\sqrt{M}
3	$\sqrt{M} \gg 3$ y $\sqrt{M} \approx q$	\bar{E}
4	$\sqrt{M} > 5$ y $\sqrt{M} \gg q$	E_i
$\sqrt{M} = \left(\frac{M^2}{4 \cdot (E_i - 1)^2} + \frac{ME_i}{(E_i - 1)} + 1 \right)^{1/2} - \frac{M}{2 \cdot (E_i - 1)}$ $q = \frac{(B_0)}{w \cdot (A^*)} \cdot \frac{D_B}{D_A}$ $E_i = 1 + q$ $\bar{E} = \left(\frac{M^2}{4 \cdot (E_i - 1)^2} + \frac{M \cdot E_i}{(E_i - 1)} + 1 \right)^{1/2} - \frac{M}{2 \cdot (E_i - 1)}$		

Donde:

\sqrt{M} y q : son los parámetros de decisión de la Tabla B.3

E: es el factor de mejora debido a la reacción química

E_i y \bar{E} : son los posibles valores del factor de mejora E bajo diferentes condiciones

m: es el orden de reacción con respecto al CO₂

n: es el orden de la reacción con respecto a la MEA

k_{mn} : es la constante cinética del sistema (para k_2 : m³/kmol·s)

A^* : es la concentración de CO₂ en el equilibrio (kmol/m³)

B_0 : es la concentración de MEA en la disolución absorbente (kmol/m³)

w: es el coeficiente estequiométrico para la MEA en la reacción CO₂-MEA

A: se refiere al CO₂

B: se refiere a la MEA

D_B : es la difusividad de MEA en una disolución de MEA 2,5 M (m²/s)

D_A : es la difusividad del CO_2 una disolución de MEA 2,5 M (m^2/s)

Se cumple que la reacción es de primer orden respecto al CO_2 y respecto a la MEA, haciendo que el sistema global sea de segundo orden, y la reacción tiene lugar en la fase líquida.

El valor de A^* se obtiene mediante la aplicación de la ley de Henry, de forma que:

$$P_{\text{CO}_2} \cdot H = A^* \quad (3.23)$$

Y el valor se la P_{CO_2} mediante la ley de Dalton o de las presiones parciales, por lo que:

$$P_{\text{CO}_2} = y_A \cdot P_T \quad (3.24)$$

Donde:

P_{CO_2} : es la presión parcial de CO_2 (kPa)

P_T : es la presión total (kPa)

H : es la constante de Henry ($\text{kmol}/\text{m}^3 \cdot \text{kPa}$)

A^* : es la concentración de CO_2 en el equilibrio (kmol/m^3)

y_A : es la fracción molar de CO_2 en la fase gaseosa

3.7 Comprobaciones

De acuerdo con el algoritmo propuesto en la Figura B.3, con los parámetros obtenidos para las diferentes secciones o volúmenes de control considerados a lo largo de la columna, es necesario comprobar:

- Que se cumpla que los valores del parámetro β en los límites inferior y superior de la sección considerada, β_1 y β_2 respectivamente, no tengan variaciones importantes. De no ser el caso, será necesario considerar una sección más pequeña de la columna, de modo que la fracción molar de CO_2 que se alcance en la parte superior del volumen de control considerado sea menor.
- Si $\frac{(y_A - y_{A0})}{y_A} > 0.9$. En función del resultado se optará por diferentes expresiones para el cálculo de la altura de la sección. Como se vio anteriormente, si el resultado es > 0.9 se escogerá la ecuación 3.9, mientras que de lo contrario se empleará la ecuación 3.10.

Donde:

y_A : es la fracción molar de CO_2 en la fase gaseosa

y_{A0} : es la fracción molar de CO_2 en la fase líquida

3.8 Cálculo de la altura de cada sección y cálculo de la altura total del relleno

Aplicación de las ecuaciones 3.9 y 3.10 según convenga. La altura total será la suma de las alturas de las diferentes secciones consideradas.

$$Z = \frac{G_s}{S \cdot a \cdot P_T \cdot \beta} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy_A}{(1 - y_A)^2} \quad (3.9)$$

$$Z = \frac{G_s}{S \cdot a \cdot P_T \cdot \beta} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy_A}{(y_A - y_{A0}) \cdot (1 - y_A)^2} \quad (3.10)$$

3.9 Cálculo de la caída de presión

Existen diferentes métodos para su determinación, en este caso se empleará la siguiente correlación:

$$\Delta P = a \cdot 10^{b \cdot l} \cdot \frac{g_F^2}{\rho_G} \quad (3.25) \quad [4]$$

Donde:

ΔP : es la caída de presión por pie de relleno (in $\text{H}_2\text{O}/\text{ft}$ de relleno)

l : es la velocidad másica de líquido ($\text{lb}/\text{s} \cdot \text{ft}^2$)

g_F : es la velocidad másica de gas ($\text{lb}/\text{s} \cdot \text{ft}^2$)

ρ_G : es la densidad del gas (lb/ft^3)

a, b : son las constantes características del relleno

Las constantes, a y b , se obtienen de la Tabla B.4.

Tabla B.4. Valores de k_2 con la temperatura. Fuente: [4]

Tipo de relleno	Constante	½ in	¾ in	1 in	1½ in	2 in
Anillo Raschig cerámicos	a	1,96	0,82	0,53	0,3	0,24
	b	0,56	0,38	0,22	0,2	0,14
Anillos Raschig metálicos	a	-	-	0,42	0,29	0,23
	b	-	-	0,21	0,20	0,14
Sillas Intalox cerámicas	a	1,04	0,52	0,52	0,13	0,12
	b	0,37	0,25	0,16	0,15	0,10
Anillos Pall cerámicos	a	-	-	0,35	0,20	0,13
	b	-	-	0,16	0,17	0,12
Anillos Pall metálicos	a	-	-	0,15	-	0,06
	b	-	-	0,15	-	0,12

Para rellenos aleatorios la caída de presión normalmente no excederá los 80 mm de agua por metro de altura de relleno. A este valor la velocidad del gas será aproximadamente el 80% de la velocidad de inundación. Los valores de diseño recomendados para absorbedores y columnas de desorción son los comprendidos entre 15 y 50 mm de agua por metro de altura de relleno. [3]

3.10 Accesorios internos de la columna

Los accesorios internos en una columna de relleno son más sencillos que en las columnas de platos, pero se deben de diseñar cuidadosamente para asegurar un buen rendimiento. Los diferentes accesorios a considerar son:

- Soporte del relleno (con flujo separado o de inyección de gas).
- Distribuidores de líquido (tipo abrevadero).
- Redistribuidores de líquido (redistribuidor total).
- Platos de contención.

Estos elementos se describen en la Memoria en el apartado 7, correspondiente a la descripción de equipos.

3.11 Consideraciones generales del diseño mecánico de recipientes a presión

Para determinar los espesores mínimos requeridos por el equipo para garantizar un funcionamiento seguro a las condiciones de operación se deben de tener en cuenta diferentes factores:

3.11.1 Presión de diseño

Un recipiente se debe de diseñar para soportar la presión máxima a la que sea probable que esté sometido durante la operación. De este modo se suele tomar como presión de diseño una presión un 10% superior a la presión normal de trabajo, con lo que se pretende que la estructura del equipo no se vea afectada en el caso de que se produzcan desviaciones del valor habitual de la presión. [3]

3.11.2 Temperatura de diseño

La resistencia de los materiales decrece con el aumento de la temperatura, por ello el esfuerzo máximo permisible dependerá de la temperatura del material. Según el estándar más ampliamente utilizado, el *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* (el código ASME BPV) La temperatura máxima de diseño a la que se evalúa el esfuerzo máximo permisible se debe tomar como la temperatura máxima de trabajo del material, con la permisibilidad debida para cualquier incertidumbre involucrada en la predicción de las temperaturas de la pared del recipiente. De este modo se obtendrá la temperatura de diseño sobredimensionando la temperatura de operación en 50 °F. [3]

3.11.3 Materiales

La selección de los materiales se realizará mediante los diagramas de Ashby pertinentes, aplicando los módulos correspondientes, de acuerdo con lo establecido en *Materials Selection in Mechanical Design* por Ashby, M. F. [8]. Por otra parte se tendrá también en cuenta los efectos de la corrosión provocada por las sustancias que se manejan.

Para el diseño de recipientes a presión de gran tamaño se debe maximizar el módulo indicado en la Tabla B.5.

Tabla B.5. Módulos a maximizar para el diseño mecánico de diferentes elementos. Fuente: [8]

Damage-tolerant design

Function and constraints	Maximize
Ties (tensile member)	
Maximum flaw tolerance and strength, load-controlled design	K_{IC} and σ_f
Maximum flaw tolerance and strength, displacement-control	K_{IC}/E and σ_f
Maximum flaw tolerance and strength, energy-control	K_{IC}^2/E and σ_f
Shafts (loaded in torsion)	
Maximum flaw tolerance and strength, load-controlled design	K_{IC} and σ_f
Maximum flaw tolerance and strength, displacement-control	K_{IC}/E and σ_f
Maximum flaw tolerance and strength, energy-control	K_{IC}^2/E and σ_f
Beams (loaded in bending)	
Maximum flaw tolerance and strength, load-controlled design	K_{IC} and σ_f
Maximum flaw tolerance and strength, displacement-control	K_{IC}/E and σ_f
Maximum flaw tolerance and strength, energy-control	K_{IC}^2/E and σ_f
Pressure vessel	
Yield-before-break	K_{IC}/σ_f
Leak-before-break	K_{IC}^2/σ_f

Por lo tanto, el diagrama de Ashby correspondiente para la maximización de este módulo es el mostrado en la Figura B.6.

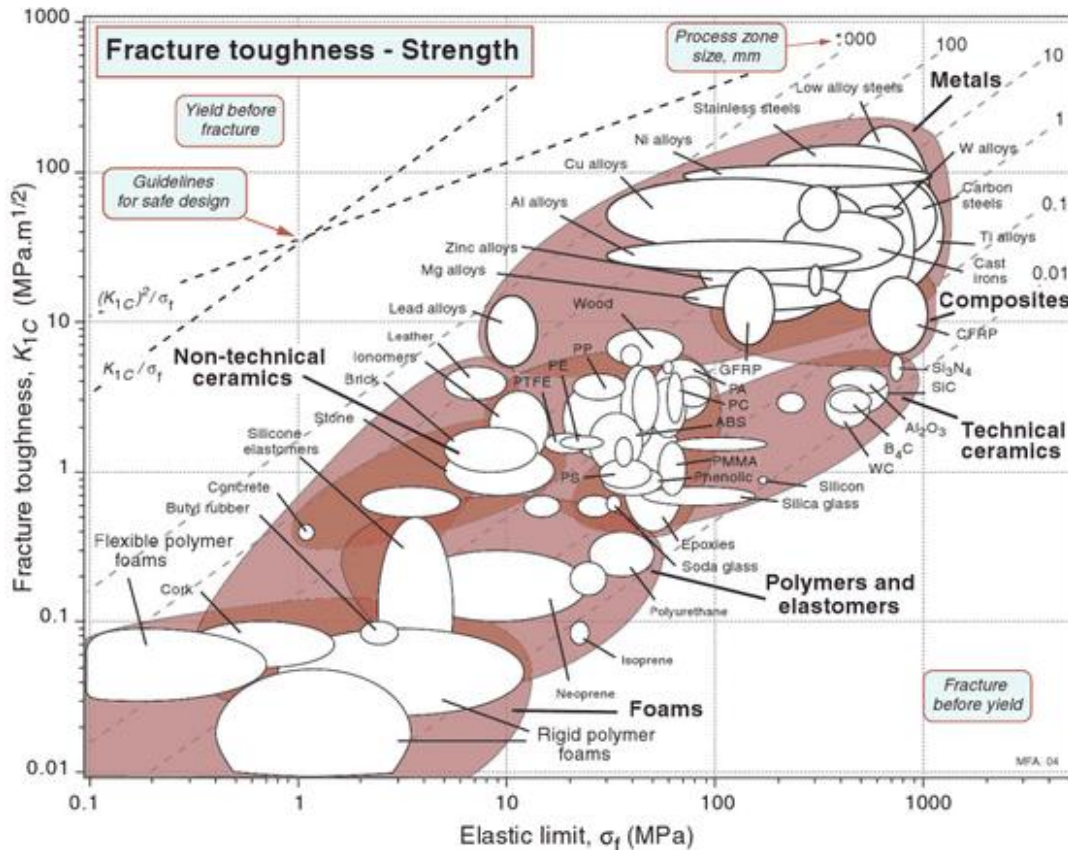


Figura B.6. Diagrama de Ashby de tenacidad – límite elástico. Fuente: [8]

Por lo tanto, en cuanto a este aspecto, serían válidas cualquier aleación de cobre, níquel, acero inoxidable o aceros de baja aleación.

A parte de la maximización del módulo en cuestión, para la selección del material también hay que tener en cuenta el efecto de la corrosión. La MEA se trata de un material corrosivo, a lo cual hay que sumarle el efecto del CO₂ disuelto (un gas ácido), y de los productos de la reacción entre la amina y el CO₂. Por lo tanto se selecciona un acero inoxidable capaz de resistir estos efectos corrosivos, concretamente el acero inoxidable AISI 347 (18Cr, 10Ni, Nb), uno de los aceros inoxidables más utilizados, que además presentará un buen comportamiento en cuanto al esfuerzo máximo permisible a las condiciones de operación, como se verá en el siguiente apartado. [3]

3.11.4 Esfuerzo máximo permisible

Los valores de esfuerzo máximo permisibles para algunos materiales comunes, incluyendo el acero inoxidable seleccionado, se muestran en la Tabla B.6.

Tabla B.6. Esfuerzos máximos permisibles típicos para materiales bajo el Código ASME BPV. Fuente: [3]

Material	Grado	Temperatura máxima (°F)	Esfuerzo máximo permisible (ksi = 1000psi) con la temperatura (°F)				
			100	300	500	700	900
Acero al carbono	A285 Gr A	900	12,9	12,9	12,9	11,5	5,9
Acero al carbono apagado	A515 Gr 60	1000	17,1	17,1	17,1	14,3	5,9
Acero de baja aleación (1¼ Cr, ½ Mo, Si)	A387 Gr 22	1200	17,1	16,6	16,6	16,6	13,6
Acero inoxidable (13 Cr)	410	1200	18,6	17,8	17,2	16,2	12,3
Acero inoxidable (18 Cr, 8 Ni)	304	1500	20,0	15,0	12,9	11,7	10,8
Acero inoxidable (18 Cr, 10 Ni, Nb)	347	1500	20,0	17,1	15,0	13,8	13,4
Acero inoxidable (18 Cr, 10 Ni, Ti)	321	1500	20,0	16,5	14,3	13,0	12,3
Acero inoxidable (16 Cr, 12 Ni, 2 Mo)	316	1500	20,0	15,6	13,3	12,1	11,5

3.11.5 Eficiencia de la unión soldada

La solidez de las soldaduras se comprueba por inspección visual y un examen radiográfico. El valor de la eficiencia de la unión utilizada en el diseño dependerá del tipo de unión y del grado de examen radiográfico. En la Tabla B.7 se muestran algunos valores típicos. [3]

Tabla B.7. Eficiencias de algunas uniones soldadas. Fuente: [3]

Descripción	Grado de examen radiográfico		
	Completo	Puntual	Ninguno
Unión doblemente soldada	1,0	0,85	0,70
Unión de soldadura única con tira de apoyo	0,9	0,8	0,65
Unión de soldadura única sin tira de apoyo	-	-	0,60
Unión de superposición doblemente rellena	-	-	0,55

3.11.6 Diámetro del equipo

Cuanto mayor diámetro tenga el equipo, menos compacto va a ser, por lo que requerirá de paredes de un mayor espesor. Esto también se verá mediante la aplicación de las ecuaciones correspondientes al cálculo de los diferentes espesores.

3.12 Cálculo de los espesores de pared

Según el Código ASME BPV, el espesor mínimo de pared debe de ser el mayor valor entre el espesor radial y el espesor longitudinal. Estos se calculan como se indica en las ecuaciones 3.26 y 3.27, respectivamente.

$$t_{radial} = \frac{P_i \cdot D_i}{2 \cdot S \cdot E - 1,2 \cdot P_i} \quad (3.26)$$

$$t_{longitudinal} = \frac{P_i \cdot D_i}{4 \cdot S \cdot E - 0,8 \cdot P_i} \quad (3.27)$$

Donde:

t: es el espesor mínimo requerido (radial o longitudinal)

P_i: es la presión interna de diseño

D_i: es el diámetro interno

S: es el máximo esfuerzo permisible

E: es la eficiencia de la unión soldada

No obstante, además de los resultados de aplicar las ecuaciones 3.26 y 3.27, hay que tener en cuenta que existe un espesor mínimo práctico de pared en función del diámetro del recipiente. Algunos de estos espesores mínimos figuran en la Tabla B.8. [3]

Tabla B.8. Espesores mínimos prácticos de pared. Fuente: [3]

Diámetro del recipiente (m)	Espesor mínimo (mm)
1	5
1 a 2	7
2 a 2,5	9
2,5 a 3,0	10
3,0 a 3,5	12

Por motivos de seguridad también se debe de considerar lo que se conoce como “corrosión permisible”. Se trata del espesor adicional añadido para permitir una cierta pérdida de material por corrosión. La corrosión es un fenómeno complejo, y no es posible ofrecer normas específicas para la estimación de la corrosión permisible requerida para todas las circunstancias. La tolerancia se debe basar en la experiencia con el material de construcción bajo condiciones de servicio similares a aquellas para el diseño propuesto. De este modo, de forma general, para aceros al carbono y de baja aleación, donde no se espera una corrosión severa, se debe usar una tolerancia mínima de 2 mm; mientras que, donde se anticipan condiciones más severas o se opera con sustancias corrosivas, como en el presente absorbedor C-301, se debe de aumentar a 4 mm. [3]

3.13 Selección de los cabezales y cálculo de su espesor

Este tipo de equipo se puede cerrar mediante cabezales de varias formas, principalmente: hemisféricos, elípticos y torisféricos. Estos cabezales se muestran en la Figura B.7.

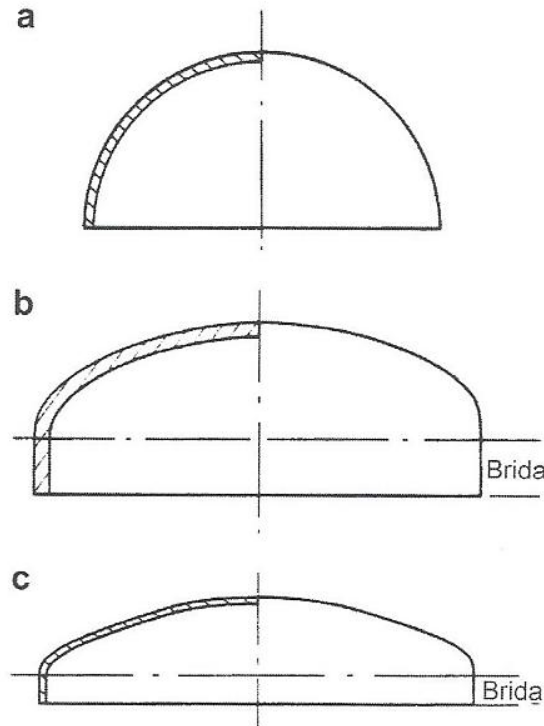


Figura B.7. Tipos de cabezales: a) Hemisférico, b) Elíptico, c) Torisférico. Fuente: [3]

Los cabezales estándar torisféricos constituyen los cierres más utilizados para recipientes a presiones menores a 15 bar. Se podrían utilizar a presiones superiores, pero por encima de 10 bar su coste ya se debe de comparar con el de un cabezal elíptico.

En cuanto a los cabezales elípticos, suelen ser el cierre más económico a utilizar a presiones superiores a 15 bar.

Por otra parte, los cabezales hemisféricos son la forma más fuerte, capaz de resistir en torno al doble de presión que un cabezal torisférico del mismo espesor. Sin embargo el coste será más elevado, por lo que este tipo de cabezales sólo se utilizarán para presiones elevadas.

La presión de operación del absorbedor C-101 es de 20 atm, con un sobredimensionamiento del 10%, se tiene una presión de diseño de 22 atm, por lo que los cabezales más adecuados serían el hemisférico o el elíptico. Se optará por uno u otro en función de los espesores requeridos, que se calcularán mediante las expresiones 3.28 y 3.29. [3]

$$t = \frac{P_i \cdot D_i}{4 \cdot S \cdot E - 0,4 \cdot P_i} \quad (3.28)$$

$$t = \frac{P_i \cdot D_i}{2 \cdot S \cdot E - 0,2 \cdot P_i} \quad (3.29)$$

3.14 Cálculo de la altura total de la columna

Para determinar la altura total de la columna se deben de considerar, además de la altura del relleno, la altura que se deje de margen por encima y por debajo del mismo, y la altura de los accesorios. Para ello se emplearán los datos de la Tabla B.9.

Tabla B.9. Alturas recomendadas para los elementos internos de la columna. Adaptado de [9]

Elemento	Alturas permitidas recomendadas (ft)
Altura máxima de la torre	175
Sección superior	4
Distribuidor de líquido	1,67
Colector de líquido	3
Redistribuidor de líquido	3
Soporte del relleno	(Se considera parte del relleno)
Sección inferior	6

4. COLUMNA DE ABSORCIÓN C-301

4.1 Introducción

La columna de absorción C-301 tiene como misión principal separar el CO₂ de la corriente gaseosa procedente del reactor *shift* de baja temperatura (LTS), R-203, previamente enfriada, y de la cual ya se han separado los condensados.

Las composiciones y propiedades de las corrientes de entrada a la columna se muestran en las Tablas B.10, B.11, B.12 y B.13.

Tabla B.10. Composiciones de la corriente gaseosa de entrada al absorbedor C-301 (corriente 27)

Componente	Caudal másico (kg/h)	Caudal molar (kmol/h)	% en moles
H ₂	3774,008	1887,004	76,970
N ₂	159,484	5,696	0,232
CO	290,443	10,373	0,423
CO ₂	20519,991	466,363	19,023
CH ₄	976,529	61,033	2,490
C ₂ H ₆	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	380,354	21,131	0,862
TOTAL	26100,808	2451,600	100,000

Tabla B.11. Propiedades de la corriente gaseosa de entrada al absorbedor C-301 (corriente 27)

Propiedad	
Temperatura (°C)	30
Presión (MPa)	2,0265
Presión (atm)	20
Densidad (kg/m ³)	8,570

La relación entre los caudales máscicos de CO₂ y de disolución de MEA 2,5M debe de ser de $36,36 \frac{\frac{kg}{h} MEA\ 2.5M}{\frac{kg}{h} CO_2}$ para garantizar la normal operación de la columna, de acuerdo con lo establecido por Prakash D. V. y Vijaykumar V. M. [1].

Por lo tanto, el caudal de líquido absorbente se fija en:

$$L = 553,3 \frac{kg}{s} de MEA\ 2.5M$$

Tabla B.12. Composiciones de la corriente líquida de entrada al absorbedor C-301 (corriente 34)

Componente	Caudal máscico (kg/h)	Caudal molar (kmol/h)	% en moles
H ₂ O	642006,900	35667,050	95,308
MEA	104174,593	1705,543	4,557
CO ₂	2211,581	50,263	0,134
TOTAL	748393,074	37422,857	100,000

Tabla B.13. Propiedades de la corriente líquida de entrada al absorbedor C-301 (corriente 34)

Propiedad	
Temperatura (°C)	30
Presión (MPa)	2,0265
Presión (atm)	20
Densidad (kg/m ³)	100
Viscosidad (cp)	0,9
Calor específico (kcal/kg·°C)	0,93
Concentración de MEA (M)	2,5

Como objetivo se pretende conseguir una corriente gaseosa de salida con una fracción molar en CO₂ del 0,007. La composición de dicha corriente se muestra en la Tabla B.14.

Tabla B.14. Composiciones de la corriente gaseosa de salida del absorbedor C-301 (corriente 37)

Componente	Caudal másico (kg/h)	Caudal molar (kmol/h)	% en moles
H ₂	3774,008	1887,004	94,386
N ₂	159,484	5,696	0,285
CO	290,443	10,373	0,519
CO ₂	615,763	13,995	0,700
CH ₄	976,529	61,033	3,053
C ₂ H ₆	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	380,354	21,131	1,057
TOTAL	6196,580	1999,23	100,000

En cuanto al relleno, como se ha visto, se seleccionan anillos Raschig cerámicos de 1½ pulgadas, capaces de resistir la corrosión provocada por la monoetanolamina y por la disolución de la misma con el CO₂ absorbido. Las características de este relleno se muestran en la Tabla B.15.

Tabla B.15. Propiedades del relleno del absorbedor C-301. Fuente: [7]

Propiedad	
Superficie específica (m ² /m ³)	140
Volumen hueco (%)	74

4.2 Balance de materia y energía entre las diferentes secciones de la columna

Como se dijo anteriormente, inicialmente se divide la columna en tres volúmenes de control, representados esquemáticamente en la Figura B.8. Las corrientes 27, 28, 34 y 37, se corresponden con aquellas representadas en los planos del Documento II del presente trabajo.

- Sección inferior: Desde la fracción molar de entrada hasta 0,07.
- Sección intermedia: Desde 0,07 a 0,03.
- Sección superior: Desde 0,03 a la fracción molar de salida.

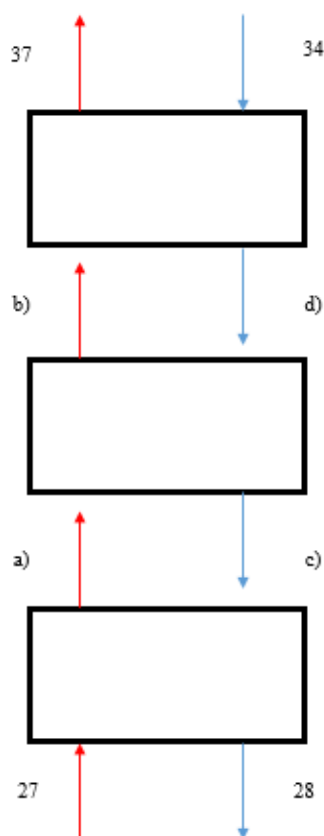


Figura B.8. Representación esquemática de las secciones consideradas y sus corrientes intermedias

Planteando los balances de materia y energía correspondientes se obtienen las composiciones y temperaturas de las corrientes intermedias, que serán necesarias para la determinación de la altura de la columna. Estos valores se recogen en las Tablas B.16, B.17, B.18, B.19, B.20 y B.21.

Tabla B.16. Composiciones y temperatura de la corriente intermedia a)

Componente	Caudal másico (kg/h)	Caudal molar (kmol/h)	% en moles
H ₂	3774,008	1887,004	88,398
N ₂	159,484	5,696	0,267
CO	290,443	10,373	0,486
CO ₂	6574,762	149,426	7,000
CH ₄	976,529	61,033	2,859
C ₂ H ₆	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	380,354	21,131	0,990
TOTAL	12155,579	2134,663	100,000
Temperatura (°C)		30	
y _A		0,07	

Tabla B.17. Composiciones y temperatura de la corriente intermedia b)

Componente	Caudal másico (kg/h)	Caudal molar (kmol/h)	% en moles
H ₂	3774,008	1887,004	92,200
N ₂	159,484	5,696	0,278
CO	290,443	10,373	0,507
CO ₂	2701,559	61,399	3,000
CH ₄	976,529	61,033	2,859
C ₂ H ₆	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	380,354	21,131	1,032
TOTAL	8282,376	2046,636	100,000
Temperatura (°C)		30	
y _A		0,03	

Tabla B.18. Composiciones y temperatura de la corriente gaseosa de salida del absorbedor C-301 (corriente 37)

Componente	Caudal másico (kg/h)	Caudal molar (kmol/h)	% en moles
H ₂	3774,008	1887,004	94,386
N ₂	159,484	5,696	0,285
CO	290,443	10,373	0,519
CO ₂	1265,400	13,995	0,700
CH ₄	976,529	61,033	3,053
C ₂ H ₆	0,000	0,000	0,000
H ₂ O	380,354	21,131	1,057
TOTAL	6846,217	1999,231	100,000
Temperatura (°C)		30,00	
y _A		0,007	

Tabla B.19. Composiciones y características de la corriente intermedia d)

Componente	Caudal másico (kg/h)	Caudal molar (kmol/h)	% en moles
H ₂ O	642006,900	35667,1	95,188
MEA	104174,593	1705,543	4,552
CO ₂	4297,377	97,668	0,261
TOTAL	748393,074	37422,857	100,000
Temperatura (°C)		32,39	
Concentración de MEA (M)		2,35	

Tabla B.20. Composiciones y características de la corriente intermedia c)

Componente	Caudal másico (kg/h)	Caudal molar (kmol/h)	% en moles
H ₂ O	642006,900	35667,1	94,965
MEA	104174,593	1705,543	4,541
CO ₂	8170,580	185,695	0,494
TOTAL	754352,073	37558,288	100,000
Temperatura (°C)		35,82	
Concentración de MEA (M)		2,08	

Tabla B.21. Composiciones y características de la corriente líquida de salida del absorbedor C-301 (corriente 28)

Componente	Caudal másico (kg/h)	Caudal molar (kmol/h)	% en moles
H ₂ O	642006,900	35667,1	94,170
MEA	104174,593	1705,543	4,503
CO ₂	22115,809	502,632	1,327
TOTAL	768297,302	37875,225	100,000
Temperatura (°C)		43,44	
Concentración de MEA (M)		1,09	

4.3 Diámetro de la columna

Para el cálculo del diámetro de la columna se sigue el procedimiento indicado en el apartado 3.4. Se ha elegido que la columna opere al 50% de las condiciones de inundación. Su cálculo se detalla en la Tabla B.22.

Tabla B.22. Cálculo del diámetro del absorbedor C-301

L (kg/s)	207,273
G (kg/s)	7,25
ρ_G (kg/m ³)	8,570
ρ_L (kg/m ³)	1000
F_{LV}	2,65
G' (kg/m²s)	2,01
Área (m²)	7,23
Diámetro (m)	3,03

4.4 Cálculo de la constante cinética de segundo orden, k_2

Procediendo de acuerdo al apartado 3.5.1 se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla B.23.

Tabla B.23. Valores de k_2 con la temperatura

Temperatura (°C)	$\log_{10}(k_2)$	k_2 (m ³ /kmol·s)
30	3,9986	9,97E+03
31	4,0218	1,05E+04
32	4,0449	1,11E+04
32,37	4,0539	1,13E+04
33	4,0679	1,17E+04
34	4,0907	1,23E+04
35	4,1134	1,30E+04
35,80	4,1318	1,35E+04
36	4,1359	1,37E+04
37	4,1582	1,44E+04
38	4,1804	1,52E+04
39	4,2025	1,59E+04
40	4,2245	1,68E+04
41	4,2463	1,76E+04
42	4,2679	1,85E+04
43	4,2894	1,95E+04
43,44	4,2989	1,99E+04

En la Tabla B.23 aparecen resaltados los valores correspondientes a las temperaturas de las corrientes de entrada y salida de las diferentes secciones consideradas.

La variación de k_2 con la temperatura se muestra gráficamente en la Figura B.9, que como es de esperar se ve favorecida con la temperatura.

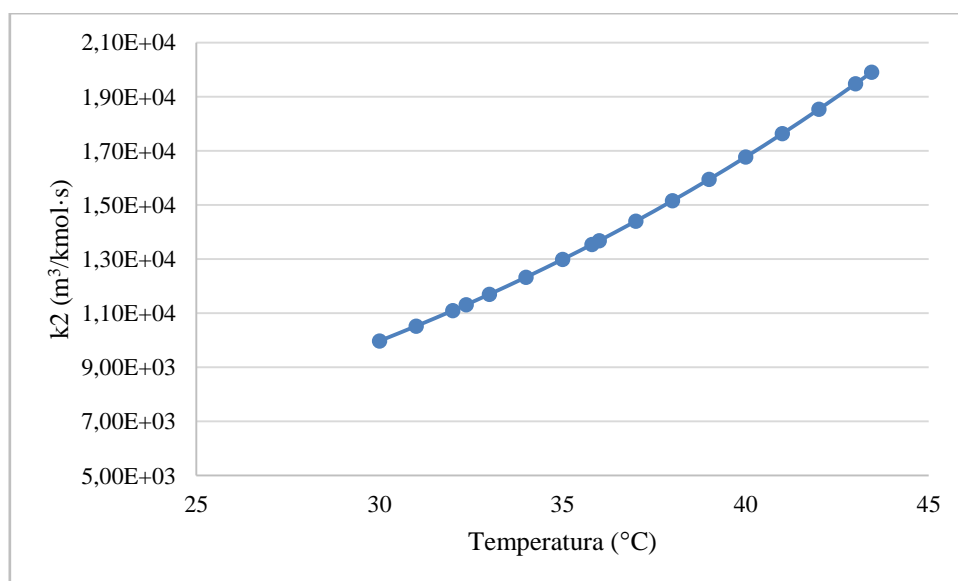


Figura B.9. Variación de k_2 con la temperatura

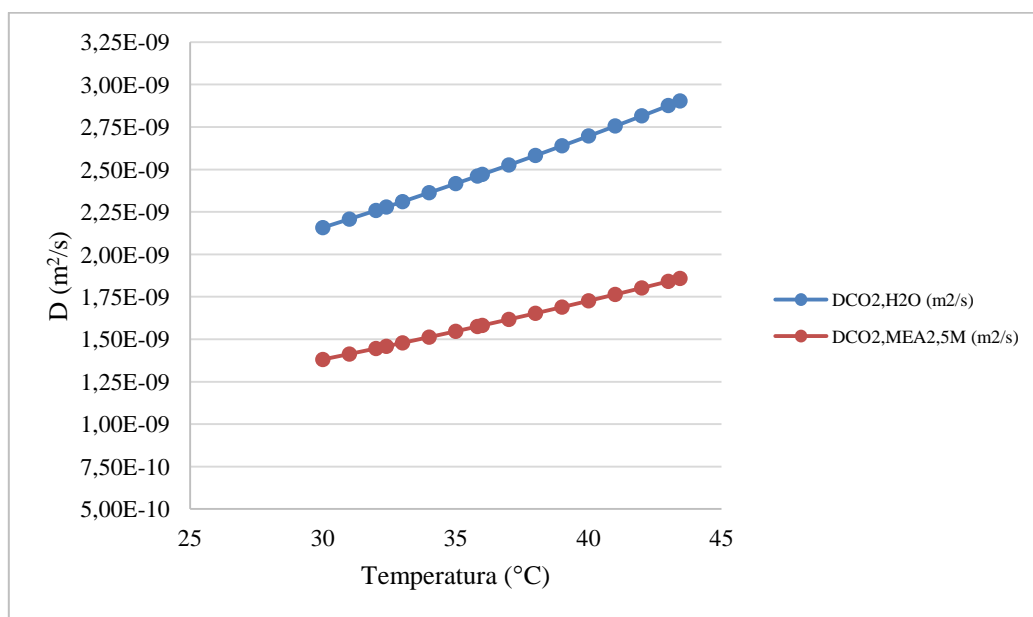
4.5 Cálculo de las difusividades

Se calculan las diferentes difusividades según se especifica en el apartado 3.5.2 obteniendo los resultados recogidos en la Tabla B.24 para diferentes temperaturas, resaltando los valores característicos de las corrientes de entrada y salida de los volúmenes de control.

Tabla B.24. Valores de las difusividades a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	$D_{\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}} = D_B \text{ (m}^2/\text{s)}$	$D_A \text{ (m}^2/\text{s)}$
30	2,16E-09	1,38E-09
31	2,21E-09	1,41E-09
32	2,26E-09	1,45E-09
32,37	2,28E-09	1,46E-09
33	2,31E-09	1,48E-09
34	2,36E-09	1,51E-09
35	2,42E-09	1,55E-09
35,80	2,46E-09	1,57E-09
36	2,47E-09	1,58E-09
37	2,53E-09	1,62E-09
38	2,58E-09	1,65E-09
39	2,64E-09	1,69E-09
40	2,70E-09	1,73E-09
41	2,76E-09	1,76E-09
42	2,82E-09	1,80E-09
43	2,88E-09	1,84E-09
43,44	2,90E-09	1,86E-09

En la Figura B.10 se ve gráficamente cómo las difusividades se ven favorecidas con la temperatura.

**Figura B.10.** Variación de las difusividades con la temperatura

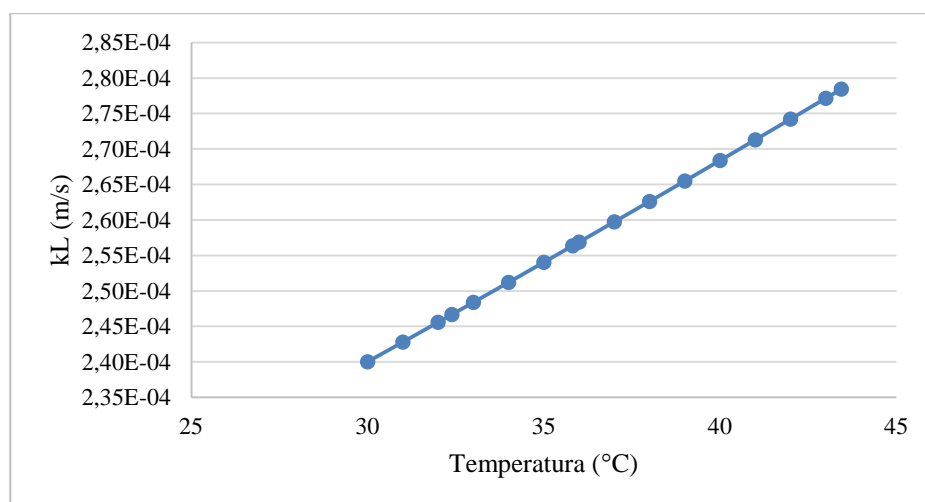
4.6 Cálculo del coeficiente de transferencia de materia en la fase líquida

Los resultados obtenidos, de acuerdo al apartado 3.5.3 se muestran en la Tabla B.25.

Tabla B.25. Valores de k_L a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	k_L (m/s)
30	2,40E-04
31	2,43E-04
32	2,46E-04
32,39	2,47E-04
33	2,48E-04
34	2,51E-04
35	2,54E-04
35,82	2,56E-04
36	2,57E-04
37	2,60E-04
38	2,63E-04
39	2,65E-04
40	2,68E-04
41	2,71E-04
42	2,74E-04
43	2,77E-04
43,44	2,78E-04

El coeficiente de transferencia de materia en la fase líquida también se ve favorecido con el aumento de la temperatura. Esta variación se muestra gráficamente en la Figura B.11.

Figura B.111. Variación de k_L con la temperatura

4.7 Cálculo de la constante de Henry

Se calculan los valores de la constante de Henry para el sistema CO_2 - MEA para diferentes temperaturas como se indica en el apartado 3.5.5. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla B.26.

Tabla B.26. Valores de la constante de Henry a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	H (kmol/m ³ kPa)
30	2,69E-04
31	2,64E-04
32	2,58E-04
32,39	2,56E-04
33	2,52E-04
34	2,47E-04
35	2,42E-04
35,82	2,37E-04
36	2,36E-04
37	2,31E-04
38	2,27E-04
39	2,22E-04
40	2,17E-04
41	2,13E-04
42	2,08E-04
43	2,04E-04
43,44	2,02E-04

Dado que la solubilidad de los gases se ve reducida con la temperatura, la constante de Henry disminuye. Esta variación se muestra gráficamente en la Figura B.12.

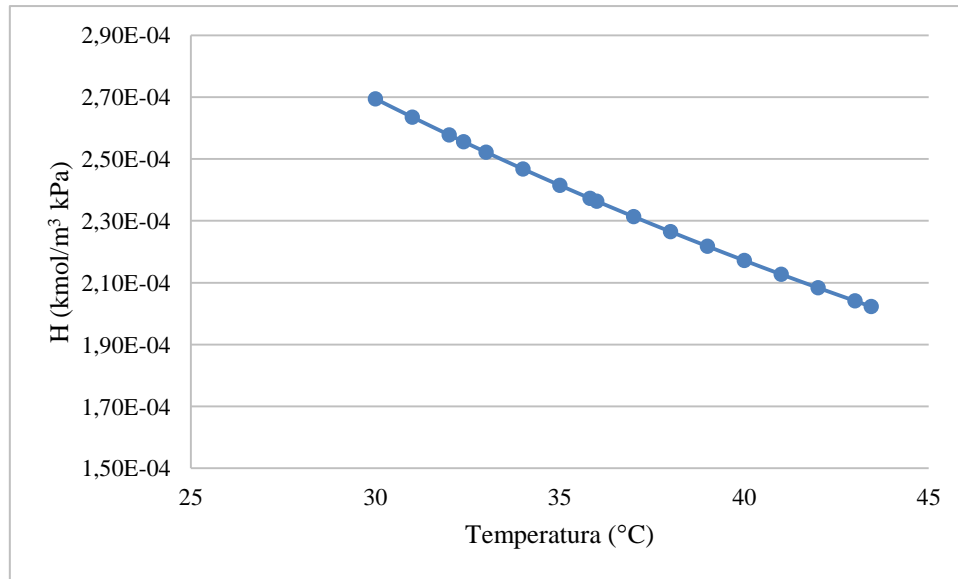


Figura B.12. Variación de la constante de Henry con la temperatura

4.8 Cálculo de la altura de la sección inferior de la columna

En esta sección se produce el cambio en la fracción molar de CO_2 en la fase gaseosa de 0,1902 a 0,07. Para este tramo inicial se pueden hacer una serie de consideraciones:

- En fracciones entre 0,25 y 0,07 la reacción entre el CO_2 y la MEA es prácticamente instantánea, por lo que se cumplen las consideraciones necesarias para emplear la ecuación 2.9. para el cálculo de la altura de la sección.
- El valor de β para esta sección se considera constante, por lo que se puede calcular directamente un valor medio del mismo.
- La mayor parte del soluto se absorbe en esta sección.

Se procede inicialmente al cálculo del parámetro β , mediante los valores medios de los diferentes parámetros, se detalla en la Tabla B.27.

Tabla B.27. Cálculo de β medio para la sección inferior de la columna

Temperatura de entrada (°C)	35,82
Temperatura de salida (°C)	43,44
m	1
n	1
D_A (m ² /s)	$1,71 \cdot 10^{-9}$
k_2 (m ³ /kmol·s)	$1,64 \cdot 10^4$
A^* (kmol/m ³)	$4,80 \cdot 10^{-2}$
B_0 (kmol/m ³)	1,584
\sqrt{M}	34,37
w	2
D_B (m ² /s)	$2,67 \cdot 10^{-9}$
q	25,80
E_i	26,80
E	26,80
H (kmol/m ³ ·kPa)	$1,60 \cdot 10^{-4}$
k_L (m/s)	$1,94 \cdot 10^{-4}$
k_G (kmol/s·kPa·m ²)	$8,20 \cdot 10^{-8}$
β (kmol/s·kPa·m²)	$7,47 \cdot 10^{-8}$

Para el cálculo del factor de mejora, E, que aparece en la Tabla B.27, se emplean los criterios de la Tabla B.3. De modo que al cumplirse el criterio número 4 de la misma ($\sqrt{M} > 5$ y $\sqrt{M} > q$), el factor E adopta el mismo valor que E_i .

De este modo se dispone de todos los datos necesarios para aplicar la ecuación 3.9 para el cálculo de la altura de la sección inferior de la columna. Este cálculo se detalla en la Tabla B.28.

$$Z = \frac{G_s}{S \cdot a \cdot P_T \cdot \beta} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy_A}{(1 - y_A)^2} \quad (3.9)$$

Tabla B.28. Cálculo de la altura de la sección inferior de la columna

G_s (kmol/s)	0,551
S (m ²)	7,23
a (m ² /m ³)	140
P_t (kPa)	2026,50
β (kmol/s·kPa·m ²)	$7,47 \cdot 10^{-8}$
y_1	0,1902
y_2	0,07
Z (m)	3,37

4.9 Cálculo de la altura de la sección intermedia de la columna

Inicialmente se considera que en esta sección se puede producir el cambio de fracción molar de CO₂ en la fase gaseosa de 0,07 a 0,03. Se aplicará el algoritmo para el cálculo de la altura de esta sección y se determinará si estos valores considerados para la fracción molar en los límites de la misma son aceptables.

Por lo tanto se obtiene primero el valor de β en la parte baja de la sección, β_1 (Tabla B.29).

Tabla B.29. Cálculo de β_1 para la sección intermedia de la columna

Temperatura (°C)	35,82
y_1	0,07
m	1
n	1
G_{entrada} (kg/s)	3,377
k_G (kmol/s·kPa·m ²)	$4,73 \cdot 10^{-8}$
k_L (m/s)	$2,56 \cdot 10^{-4}$
H (kmol/ m ³ ·kPa)	$2,37 \cdot 10^{-4}$
D_A (m ² /s)	$1,57 \cdot 10^{-9}$
k_2 (m ³ /kmol·s)	$1,35 \cdot 10^4$
P_{CO_2} (kPa)	141,86
A^* (kmol/m ³)	$3,37 \cdot 10^{-2}$
B_0 (kmol/m ³)	2,078
\sqrt{M}	25,97
w	2
D_B (m ² /s)	$2,46 \cdot 10^{-9}$
q	48,23
E	25,97
β_1 (kmol/s·kPa·m²)	$4,59 \cdot 10^{-8}$

De nuevo, el valor del factor de mejora E se calcula de acuerdo a los criterios de la Tabla B.3. En este caso se cumple el criterio número 2 ($3 \ll \sqrt{M} \ll q$), por lo que el factor E tomaría el mismo valor que \sqrt{M} .

A continuación se obtiene el valor de β en la parte superior de la sección, β_2 , para determinar si la variación es lo suficientemente baja como para considerar un valor medio (Tabla B.30).

Tabla B.30. Cálculo de β_2 para la sección intermedia de la columna

Temperatura (°C)	32,39
y_2	0,03
m	1
n	1
G_{salida} (kg/s)	2,30
k_G (kmol/s·kPa·m ²)	$3,59 \cdot 10^{-8}$
k_L (m/s)	$2,47 \cdot 10^{-4}$
H (kmol/ m ³ ·kPa)	$2,56 \cdot 10^{-4}$
D_A (m ² /s)	$1,46 \cdot 10^{-9}$
k_2 (m ³ /kmol·s)	$1,13 \cdot 10^4$
P_{CO_2} (kPa)	60,80
A^* (kmol/m ³)	$1,55 \cdot 10^{-2}$
B_0 (kmol/m ³)	2,352
\sqrt{M}	25,27
w	2
D_B (m ² /s)	$2,28 \cdot 10^{-9}$
q	118,26
E	25,27
β_2 (kmol/s·kPa·m²)	$3,51 \cdot 10^{-8}$

Nuevamente, para el cálculo del factor de mejora E se emplean los criterios de la Tabla B.3. Se cumple de nuevo el criterio número 2 ($3 \ll \sqrt{M} \ll q$), por lo que el factor E tomaría el mismo valor que \sqrt{M} .

La variación existente entre β_1 y β_2 es del 22,04%, que se considera lo suficientemente baja como para poder suponer un valor medio para β , que sería:

$$\beta_{\text{medio}} = 4,05 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{s} \cdot \text{kPa} \cdot \text{m}^2}$$

A partir de los parámetros de la Tabla B.31 se determina cuál es la ecuación oportuna para el cálculo de la altura de esta sección.

Tabla 31. Determinación de la ecuación para el cálculo de Z a emplear en la sección intermedia

y_A	0,03
y_{A0}	0,00261
$(y_A - y_{A0}) / y_A$	0,913

Como $(y_A - y_{A0}) / y_A$ es mayor de 0,9, se cumplen los requisitos expuestos en el apartado 3.1 para el uso de la ecuación 3.9. De este modo, el cálculo de la altura para la parte intermedia de la columna se detalla en la Tabla B.32.

$$Z = \frac{G_s}{S \cdot a \cdot P_T \cdot \beta} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy_A}{(1 - y_A)^2} \quad (3.9)$$

Tabla B.32. Cálculo de la altura de la parte intermedia de la columna

G_s (kmol/s)	0,551
S (m ²)	7,23
a (m ² /m ³)	140
P_t (kPa)	2026,50
β (kmol/s·kPa·m ²)	$4,05 \cdot 10^{-8}$
y_1	0,07
y_2	0,03
Z (m)	6,19

4.10 Cálculo de la altura de la sección superior de la columna

Inicialmente se considera que en esta sección se puede producir el cambio de fracción molar de CO₂ en la fase gaseosa de 0,03 a 0,007, el objetivo a alcanzar con el diseño del absorbedor. Como en la sección anterior, se aplicará el algoritmo para el cálculo de la altura y se determinará si estos valores considerados para la fracción molar en los límites de la misma son aceptables.

Por lo tanto se obtiene primero el valor de β en la parte baja de la sección, β_1 (Tabla B.33).

Tabla B.33. Cálculo de β_1 para la sección superior de la columna

Temperatura (°C)	32,39
y_1	0,03
m	1
n	1
G_{entrada} (kg/s)	2,300
k_G (kmol/s·kPa·m ²)	$3,59 \cdot 10^{-8}$
k_L (m/s)	$2,47 \cdot 10^{-4}$
H (kmol/m ³ ·kPa)	$2,56 \cdot 10^{-4}$
D_A (m ² /s)	$1,46 \cdot 10^{-9}$
k_2 (m ³ /kmol·s)	$1,13 \cdot 10^4$
P_{CO_2} (kPa)	60,80
A^* (kmol/m ³)	$1,55 \cdot 10^{-2}$
B_0 (kmol/m ³)	2,352
\sqrt{M}	25,27
w	2
D_B (m ² /s)	$2,28 \cdot 10^{-9}$
q	118,26
E	25,27
β_1 (kmol/s·kPa·m²)	$3,51 \cdot 10^{-8}$

A continuación se obtiene el valor de β en la parte superior de la sección, β_2 , para determinar si la variación es lo suficientemente baja como para considerar un valor medio (Tabla B.34).

Tabla B.34. Cálculo de β_2 para la sección superior de la columna

Temperatura (°C)	30,00
y_2	0,007
m	1
n	1
G_{salida} (kg/s)	1,721
k_G (kmol/s·kPa·m ²)	$2,91 \cdot 10^{-8}$
k_L (m/s)	$2,40 \cdot 10^{-4}$
H (kmol/m ³ ·kPa)	$2,69 \cdot 10^{-4}$
D_A (m ² /s)	$1,38 \cdot 10^{-9}$
k_2 (m ³ /kmol·s)	$9,97 \cdot 10^3$
P_{CO_2} (kPa)	14,19
A^* (kmol/m ³)	$3,82 \cdot 10^{-3}$
B_0 (kmol/m ³)	2,500
\sqrt{M}	24,44
w	2
D_B (m ² /s)	$2,16 \cdot 10^{-9}$
q	510,93
E	24,44
β_2 (kmol/s·kPa·m ²)	$2,86 \cdot 10^{-8}$

La variación existente entre β_1 y β_2 es del 16,93%, que se considera lo suficientemente baja como para poder suponer un valor medio para β , que sería:

$$\beta_{\text{medio}} = 3,19 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kmol}}{\text{s} \cdot \text{kPa} \cdot \text{m}^2}$$

Mediante los parámetros de la Tabla B.35 se determina cuál es la ecuación oportuna para el cálculo de la altura de esta sección:

Tabla B.35. Determinación de la ecuación para el cálculo de Z a emplear en la sección superior

y_A	0,007
y_{A0}	0,001343
$(y_A - y_{A0}) / y_A$	0,808

Como $(y_A - y_{A0}) / y_A$ es menor de 0,9, no se cumplen los requisitos expuestos en el apartado 3.1 para el uso de la ecuación 3.9. Por lo tanto para la altura de la sección superior de

la columna, a diferencia de las anteriores, se empleará la ecuación 3.10. Este cálculo se detalla la Tabla B.36.

$$Z = \frac{G_s}{S \cdot a \cdot P_T \cdot \beta} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy_A}{(y_A - y_{A0}) \cdot (1 - y_A)^2} \quad (2.10)$$

Tabla B.36. Cálculo de la altura de la parte superior de la columna

G_s (kmol/s)	0,551
S (m ²)	7,23
a (m ² /m ³)	140
P_t (kPa)	2026,50
β (kmol/s·kPa·m ²)	$3,19 \cdot 10^{-8}$
y_1	0,03
y_2	0,007
Z (m)	14,13

4.11 Cálculo de la altura total del relleno

Una vez conocida la altura de los tres tramos considerados, la altura total del relleno necesario será simplemente la suma de las alturas.

Tabla B.37. Cálculo de la altura total del relleno

Z_1 (m)	3,37
Z_2 (m)	6,19
Z_3 (m)	14,13
Z_{TOTAL} (m)	23,69

4.12 Cálculo de la caída de presión

Una vez completado el dimensionamiento básico de la columna de absorción C-301 se procede a calcular la caída de presión conforme a lo indicado en el apartado 3.9. Este cálculo se detalla en la Tabla B.38.

Tabla B.38. Cálculo de la caída de presión a través del relleno

l (lb/s·ft ²)	5,872
g_F (lb/s·ft ²)	0,205
ρ_G (lb/ft ³)	0,535
a	0,3
b	0,2
$\Delta P/L$ (in H ₂ O/ft)	0,354
$\Delta P/L$ (mm H ₂ O/m)	29,45
ΔP (Pa)	6839,3

El resultado obtenido está dentro del rango recomendado de 15 a 50 mm de agua por metro de relleno. [3]

4.13 Diseño mecánico

4.13.1 Accesorios internos de la columna

En base a lo especificado en el punto 3.10 se seleccionan los elementos internos de la columna correspondientes, los cuales se recogen en la Tabla B.39.

Tabla B.39. Accesorios internos de la columna

Elemento	Tipo
Soporte del relleno	Con flujo separado o de inyección de gas
Distribuidores de líquido	Abrevadero
Redistribuidores de líquido	Redistribuidor total
Platos de contención	Estándar

En cuanto a los redistribuidores, la máxima altura de relleno que se puede instalar sin necesidad de redistribuidores es de 8 metros, por lo que, como la altura total del relleno es de 23,69 m, sería necesario instalar 2 redistribuidores (dado que la altura se encuentra entre 16 y 24 m).

4.13.2 Espesores de carcasa y cabezales

Conforme a lo expuesto en los puntos 3.11, 3.12 y 3.13 se calculan los espesores de la carcasa de la columna y de los cabezales, seleccionando, en base a esto, el tipo de cabezal.

El esfuerzo máximo permisible para el acero inoxidable seleccionado, AISI 347 (18 Cr, 10 Ni, Cb), para temperaturas de diseño de entre 100 y 300 °F, es de 17100 psi. Asimismo, se utiliza una soldadura de soldadura única con tira de apoyo, se tiene un valor para la eficiencia de 0,9. Además se considera un sobreespesor por corrosión de 4 mm, conforme a lo especificado en el apartado 3.12. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla B.40.

Tabla B.40. Cálculo de los espesores de la carcasa y de los cabezales

$T_{\text{operación}} (^{\circ}\text{F})$	86
$T_{\text{diseño}} (^{\circ}\text{F})$	136
$P_{\text{operación}} (\text{atm})$	20
$P_{\text{diseño}} (\text{atm})$	22
Diámetro (m)	3,03
Esfuerzo máximo permisible (psi)	17100
E	0,9
$t_{\text{radial}} (\text{mm})$	36,27
$t_{\text{longitudinal}} (\text{mm})$	20,00
$t_{\text{carcasa}} (\text{mm})$	36,27
$t_{\text{cabezal esférico}} (\text{mm})$	19,97
$t_{\text{cabezal elíptico}} (\text{mm})$	35,93
$t_{\text{cabezal}} (\text{mm})$	19,97

El cabezal seleccionado es finalmente el cabezal esférico, dado que, aunque su fabricación sea más costosa, el espesor requerido es la mitad que el del cabezal elíptico.

4.14 Cálculo de la altura total de la columna

Considerando todos los elementos internos y el espaciado necesario por encima y por debajo del relleno, de acuerdo a lo especificado en el punto 3.14, se obtiene la altura total de la columna. Los resultados se muestran en la Tabla B.41.

Tabla B.41. Cálculo de la altura total de la columna

Altura del relleno (m)	23,69
Espacio superior (m)	1,22
Distribuidor de líquido (m)	0,51
Redistribuidores de líquido (x2) (m)	1,83
Soporte del relleno (m)	(No le suma altura al relleno)
Espacio inferior (m)	1,83
Altura total (m)	29,08

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] VAIDYA, P. D., MAHAJANI, V. V. Quickly design CO₂ – amine absorber. *Indian Journal of Chemical Technology*, 2006, 13, 47-52. ISSN 0971-457X
- [2] KIRK, R. E. *Encyclopedia of Chemical Technology*, Volumen 1. 4ª edición, EE.UU.: John Wiley & Sons, 1991. ISBN 0-471-52669-X
- [3] SINNOTT, R., TOWLER, G. *Diseño en ingeniería química*. 5ª edición, Barcelona: Reverté, 2009. ISBN 978-84-291-7199-0
- [4] BACKHURST, J. R., HARKER, J. H. *Process plant design*. 1ª edición, Londres: Heinemann Educational Books, 1973. ISBN 0-435-72563-7
- [5] YEH, J. T., PENNLIN, H. W. Study of CO₂ absorption and desorption in a packed column. *Energy & Fuels*, 2001, 15(2), 274-278. ISSN 0887-0624
- [6] MORALES PINO, F. *Endulzamiento del gas natural* [pdf en línea]. Universidad de Oriente, Escuela de Ingeniería de Petróleo, Venezuela [consultado el 25 de febrero de 2016]. Disponible en: <https://carteleraelectronica.files.wordpress.com/2011/12/endulzamiento-de-gas-natural.pdf>.
- [7] PERRY, R. H. *Manual del ingeniero químico*, Volumen 3. 7ª edición (4ª en español), Madrid: McGraw-Hill, 2001. ISBN 84-481-3344-7
- [8] ASHBY, M. F. *Materials selection in mechanical design*. 4ª edición, Oxford: Elsevier, 2011. ISBN 978-1-85617-663-7
- [9] BRANAN, C. *Rules of Thumb for Chemical Engineers*. 4ª edición, EE.UU.: Elsevier, 2005. ISBN 0-7506-7856-9

Parte C. Conducciones

Planta de Producción de Hidrógeno por

Reformado de Gas Natural

INDICE PARTE C

1. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	114
1.1 Material de construcción	114
1.2 Diámetro.....	114
1.3 Características estándar de las conducciones	115
1.4 Velocidad del fluido	115
2. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE CONDUCCIONES.....	116
3. BIBLIOGRAFÍA	120

1. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Es necesario proporcionar una información mínima acerca de las tuberías y conducciones que conectan los diferentes equipos de la *Planta de producción de hidrógeno por reformado de gas natural*. De este modo, en este apartado se especifican los materiales de construcción de las conducciones, el Schedule y los diámetros nominales, internos, externos.

1.1 Material de construcción

La mayoría de las conducciones de la planta están fabricadas en acero inoxidable (SS), capaz de resistir los efectos corrosivos de las sustancias que transportan. Estas son principalmente: CO₂, H₂S y MEA. Por otra parte, las conducciones que no contengan estas sustancias están fabricadas en acero al carbono (CS), como es el caso de las conducciones que transportan vapor de agua.

1.2 Diámetro

Toda tubería por la que circule un fluido tendrá un determinado diámetro óptimo desde el punto de vista económico. El coste capital de una tubería aumenta con el diámetro, mientras que el coste de impulsión del fluido disminuye con el aumento del diámetro. De este modo, el diámetro más económico será aquel que ofrezca el coste global más bajo. [1]

Existen varias expresiones para la determinación del diámetro óptimo. En este trabajo se emplea la ecuación 1.2. [2]

$$d_{\text{óptimo}} = 293 \cdot G^{0,53} \cdot \rho^{-0,37}$$

Donde:

$d_{\text{óptimo}}$: es el diámetro interno económicamente óptimo (mm).

G: es el caudal másico (kg/s).

ρ : es la densidad del fluido (kg/m³)

1.3 Características estándar de las conducciones

Una vez calculado el diámetro óptimo, se seleccionará el diámetro estándar más próximo al obtenido, de acuerdo con los estándares ANSI/ASME. Estableciéndose, en consecuencia, un diámetro interno y un diámetro externo, en función del Schedule seleccionado. [3]

El Schedule es un parámetro indicativo del espesor de la conducción. De esta forma para conducciones donde la presión sea menor a 16 bares, se emplea el Schedule 40, y en el resto Schedule 80, ya que este último presenta un mayor espesor de tubería.

1.4 Velocidad del fluido

No obstante, además del diámetro de la tubería, hay que tener en cuenta la velocidad resultante del fluido que circula por la conducción, de modo que se mantenga en valores apropiados.

En la Tabla C.1 se recogen algunos rangos de velocidades típicos, según la bibliografía, mientras que en la Tabla C.2 se recogen algunos valores de referencia estimados en función de la densidad del fluido que se transporta.

Tabla C.1. Velocidades típicas de fluidos en tuberías. Adaptado de: [1] y [4]

Fluido	Velocidad (m/s)
Líquidos bombeados (no viscosos)	1 - 3
Líquidos viscosos	0,06 – 0,6
Vapor de agua	9 – 15
Gases	9 - 30

Tabla C.2. Velocidades típicas de fluidos en tuberías en función de su densidad. Fuente: [1]

ρ (kg/m ³)	Velocidad (m/s)
1600	2,4
800	3,0
160	4,9
16	9,4
0,16	18,0
0,016	34,0

2. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE CONDUCCIONES

Los resultados correspondientes al diámetro de tuberías y pérdidas de carga se muestran en la Tabla C.3. Los números de las corrientes indicados se corresponden con la nomenclatura empleada en el diagrama de flujo y en el P&ID. Se puede observar como las velocidades resultantes son adecuadas, atendiendo a los valores de las Tablas C.1 y C.2, en función del tipo de fluido y de su densidad.

Nótese que en la Tabla C.3 no se recoge la corriente 5, a pesar de que si aparece indicada en los diferentes diagramas del proceso y en los balances de materia y energía. Esto se debe a que por ella circula un caudal extremadamente bajo de vapor de agua. Este vapor se introducía para compensar las pérdidas de vapor que se pudiesen escapar junto a los gases ácidos en el sistema de separación de azufre con aminas. Por ello, lo habitual es que esta inyección de vapor no se realice de manera continua, por lo que el caudal que en teoría sería necesario aportar para mantener el contenido en vapor del sistema en estado estacionario no sería representativo para el cálculo de esta conducción.

Tabla C.3. Resultados del cálculo de tuberías

Corriente	Material	Schedule	Q (kg/s)	ρ (kg/m ³)	D _{óptimo} (mm)	D _{óptimo} (in)	D _{nominal} (in)	D _{ext} (in)	D _{int} (in)	Velocidad (m/s)	Fase
1	SS	40	2,40	12,66	182,2	7,17	6	6,625	6,065	10,17	Gas
2	SS	40	0,15	980,7	8,53	0,34	3/8	0,675	0,493	1,28	Líquido
3	SS	40	0,15	931,8	8,69	0,34	3/8	0,675	0,493	1,351	Líquido
4	SS	40	0,15	931,6	8,69	0,34	3/8	0,675	0,493	1,351	Líquido
6	SS	40	0,15	926,9	8,42	0,33	3/8	0,675	0,493	1,275	Líquido
7	SS	40	0,15	931,4	8,41	0,33	3/8	0,675	0,493	1,269	Líquido
8	SS	40	0,15	976,8	8,26	0,33	3/8	0,675	0,493	1,210	Líquido
9	SS	40	0,15	995,1	8,20	0,32	3/8	0,675	0,493	1,188	Líquido
10	SS	40	0,01	19,20	8,29	0,33	1/8	0,405	0,269	13,41	Gas
11	SS	40	2,39	8,238	213,2	8,39	8	8,625	7,981	8,994	Gas
12	SS	40	0,10	4,585	50,4	1,98	2	2,375	2,067	10,52	Gas
13	SS	40	2,50	7,959	220,8	8,69	8	8,625	7,981	9,716	Gas
14	SS	40	2,50	10,14	201,9	7,95	6	6,625	6,065	13,20	Gas
15	CS	40	8,08	7,870	413,4	16,27	16	16	14,314	9,891	Vapor de agua
16	SS	40	10,58	8,377	465,9	18,34	18	18	16,126	9,584	Gas
17	SS	80	10,58	5,271	553,0	21,77	20	20	17,938	12,31	Gas
18	SS	80	10,58	2,161	769,1	30,28	30	30	27,250	13,00	Gas
19	SS	80	10,58	3,839	621,8	24,48	24	24	21,564	11,70	Gas

Tabla C.3 (Continuación). Resultados del cálculo de tuberías

Corriente	Material	Schedule	Q (kg/s)	ρ (kg/m ³)	D _{óptimo} (mm)	D _{óptimo} (in)	D _{nominal} (in)	D _{ext} (in)	D _{int} (in)	Velocidad (m/s)	Fase
20	SS	80	10,58	3,357	653,4	25,73	24	24	21,564	13,37	Gas
21	SS	80	10,58	5,365	549,4	21,63	20	20	17,938	12,09	Gas
22	SS	80	10,58	4,774	573,6	22,58	24	24	21,564	9,404	Gas
23	SS	80	10,58	9,959	437,0	17,20	18	18	16,126	8,061	Líquido/Gas
24	CS	80	3,33	1004	43,0	1,69	1,5	2,375	1,939	1,740	Líquido
25	SS	80	7,25	6,766	412,7	16,25	16	16	14,314	10,32	Gas
26	SS	80	7,25	7,965	388,5	15,30	14	14	12,500	11,50	Gas
27	SS	80	7,25	8,570	378,1	14,89	14	14	12,500	10,69	Gas
28	SS	80	213,42	980,8	393,1	15,48	16	16	14,314	2,096	Líquido
29	SS	80	213,42	930,9	400,7	15,78	16	16	14,314	2,208	Líquido
30	SS	40	213,42	929,9	400,9	15,78	16	16	15,000	2,013	Líquido
31	SS	40	207,89	919,2	397,1	15,63	16	16	15,000	1,984	Líquido
32	SS	80	207,89	919,3	397,0	15,63	16	16	14,314	2,178	Líquido
33	SS	80	207,89	970,4	389,2	15,32	16	16	14,314	2,063	Líquido
34	SS	80	207,89	991,5	386,1	15,20	16	16	14,314	2,020	Líquido
35	SS	40	5,53	2,431	522,1	20,56	20	20	18,814	12,68	Gas
36	CS	40	2,26·10 ⁻⁴	0,890	3,58	0,14	1/8	0,405	0,215	10,86	Vapor de agua
37	SS	80	1,72	2,487	278,9	10,98	10	10,75	9,750	14,37	Gas

Tabla C.3 (Continuación). Resultados del cálculo de tuberías

Corriente	Material	Schedule	Q (kg/s)	ρ (kg/m ³)	D _{óptimo} (mm)	D _{óptimo} (in)	D _{nominal} (in)	D _{ext} (in)	D _{int} (in)	Velocidad (m/s)	Fase
38	SS	40	0,76	1,279	232,0	9,14	10	10,75	10,020	11,75	Gas
39	SS	40	0,66	1,279	214,7	8,45	8	8,625	7,981	16,00	Gas
40	SS	40	0,10	1,279	80,8	3,18	3	3,5	3,068	17,11	Gas
41	CS	80	0,96	1,625	239,1	9,41	10	10,75	10,020	11,57	Gas

3. BIBLIOGRAFÍA

[1] SINNOTT, R., TOWLER G., *Diseño en ingeniería química*. 5ª edición, Barcelona: Reverté, 2009. ISBN 978-84-291-7199-0

[2] SINNOTT, R., TOWLER G., *Chemical Engineering Design*. 4ª edición, Oxford: Elsevier, 2005. ISBN 978-00-804-9255-1

[3] LUDWIG, E., *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, Volumen 1. 3ª edición, EE.UU.: Butterworth-Heinemann, 1999. ISBN 0-88415-025-9

[4] McCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOT, P., *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4ª edición, Madrid: McGraw-Hill, 1991. ISBN 0-07-044828-0

Anexo IV.

Viabilidad económica

Planta de Producción de Hidrógeno por

Reformado de Gas Natural

INDICE ANEXO IV

1. INTRODUCCIÓN	4
2. CAPITAL INMOVILIZADO	4
3. CAPITAL CIRCULANTE	4
4. COSTES DE EXPLOTACIÓN	4
4.1 Gastos de personal.....	5
4.2 Costes de mantenimiento	6
4.3 Materias primas y utilidades	6
4.3.1 Gas natural.....	6
4.3.2 Agua y vapor de agua.....	7
4.3.3 Electricidad.....	8
4.4 Reemplazo de catalizadores y adsorbente	8
4.5 Costes de seguro.....	9
4.6 Costes totales.....	9
5. INGRESOS	10
5.1 Venta de hidrógeno producido	10
6. PRÉSTAMO E INTERÉS	10
7. BENEFICIOS ANTES DE IMPUESTOS (BAT).....	11
8. IMPUESTO DE SOCIEDADES	12
9. FLUJOS DE CAJA	12
10. VALOR ACTUAL NETO (VAN).....	13
11. TASA INTERNA DE RENTABILIDAD (TIR).....	13
12. TIEMPO DE RETORNO.....	14
13. RESULTADOS OBTENIDOS	14

13.1 Valoración final.....	19
14.BIBLIOGRAFÍA	20

1. INTRODUCCIÓN

En el presente Anexo se realiza el estudio de la viabilidad económica de la planta de reformado de gas natural.

Para ello, es necesario contabilizar los gastos de explotación y los ingresos derivados de la venta de producto, además de la inversión inicial para la construcción de la instalación.

La viabilidad o inviabilidad económica del proyecto se basa en tres factores: [1, 2]

- Valor Actual Neto (VAN)
- Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)
- Tiempo de retorno de la inversión

2. CAPITAL INMOVILIZADO

El capital fijo o, también llamado capital inmovilizado, incluye el capital instalado en el emplazamiento de la planta. En consecuencia, se parte de la estimación realizada en el Documento V: Presupuesto del presente proyecto.

El capital inmovilizado asciende a un total de 107.603.654,38 euros.

3. CAPITAL CIRCULANTE

El capital circulante es aquel necesario para realizar las tareas iniciales de la planta, como materias primas almacenadas, e incluso producto final en stock. De nuevo, esta partida es determinada en el Documento V: Presupuesto.

La suma debida a este capital supone un gasto de 18.362.758,55 euros.

4. COSTES DE EXPLOTACIÓN

Los costes de explotación se deben a los gastos generados durante el funcionamiento de la planta. A continuación se detalla cada uno de ellos.

4.1 Gastos de personal

Una forma de estimar la mano de obra necesaria en una planta industrial es mediante el empleo de la Figura IV.1 en función de su tipo y de la capacidad. [3]

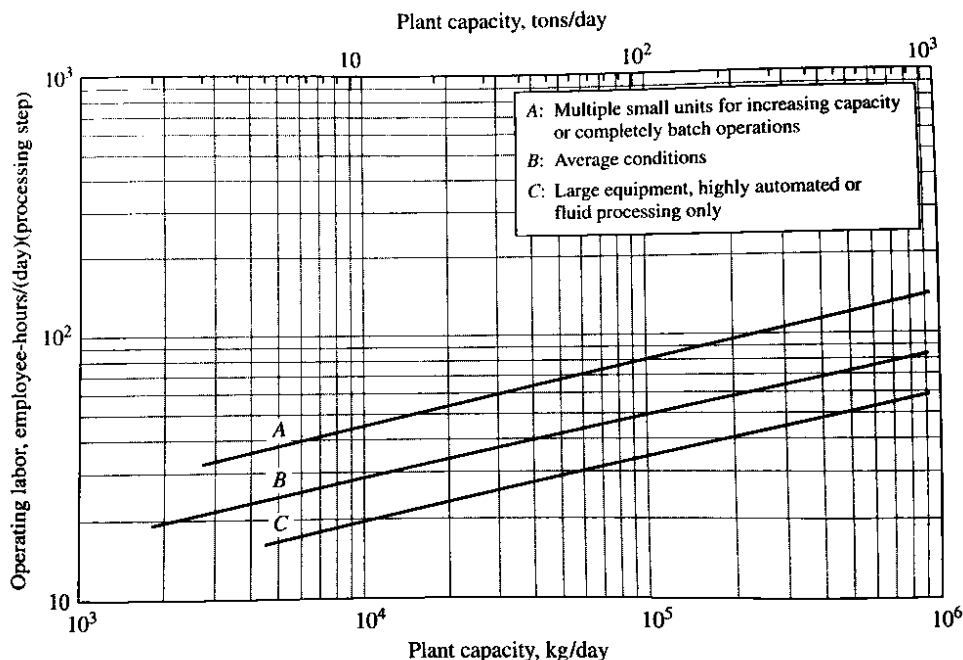


Figura IV.1. Requerimientos de mano de obra operativa en una industria química. Fuente: [3]

Para una capacidad de aproximadamente 83.000 kg/día de hidrógeno y teniendo en cuenta que la presente planta es de alta capacidad con alto grado de automatización y que trabaja solamente con fluidos, el número de horas de trabajo diarias por turno está en torno a 34.

Asumiendo una operación de 350 días al año y tres turnos diarios, en número total de horas es de 35.700 horas de trabajo al año.

El sueldo medio por trabajador al año es de 35.000 euros o 16,83 euros la hora, con lo que los gastos de mano de obra asciende a una cantidad de 600.831,00 euros. [4]

Además de ello, se debe contabilizar otro personal dedicado a labores de supervisión o administración. Se estima que los costes asociados a la supervisión equivalen al 15 % de los costes de mano de obra. Por otro lado, los costes administrativos ascienden a un 20 % de los de mano de obra. [3]

En consecuencia, los gastos totales derivados de los pagos de todo el personal de la planta ascienden a una cantidad de 811.121,85 euros al año.

4.2 Costes de mantenimiento

Los costes anuales de reparación y mantenimiento se pueden estimar en base al tipo de operación.

En la Tabla IV.1 se recoge la equivalencia de los gastos de mantenimiento según el tipo de operación en porcentaje de capital inmovilizado.

Tabla IV.1. Estimación de los costes de mantenimiento y reparación. Fuente: [3]

Tipo de operación	% de la inversión de capital fijo		
	Mano de obra	Materiales	Total
Procesos químicos simples	1-3	1-3	2-6
Proceso medio con condiciones normales de operación	2-4	3-5	5-9
Procesos complicados, condiciones de operación severas o instrumentación excesiva	3-5	4-6	7-11

Debido a la existencia de condiciones de operación severas por las altas presiones y temperaturas y la presencia de fluidos corrosivos, se considera que los gastos de mantenimiento equivalen a un porcentaje medio del 9 % del capital fijo.

En consecuencia, el coste anual de dichas operaciones de mantenimiento asciende a 11.007.420,89 euros.

4.3 Materias primas y utilidades

4.3.1 Gas natural

La principal materia prima para producir el hidrógeno es gas natural. Además de ello, también es empleado como combustible para obtener el calor necesario en el reformador R-201, con lo que también se debe contabilizar dicho gasto.

El precio medio del gas natural en 2016 es de 1,7 €/millones de BTU. [5]

Se asume un factor de conversión de 11,70 kWh por cada metro cúbico de gas natural. [6]

Como alimentación se emplean unos 515,2 kmol/h de gas natural, proporcionando un coste anual de 6.575.466 euros al año.

Para determinar el gasto de combustible en R-201 se parte de los requerimientos de energía, los cuales se estiman en 60 MW. Esta energía no procede totalmente de la quema de gas natural, si no que se emplean también los gases residuales procedentes del sistema de purificación PSA.

Los gases procedentes del PSA presentan un caudal de 258,4 kmol/h, con una composición aproximada del 63 % de H_2 , un 20 % de CH_4 y un 3 % de CO. Los demás componentes se corresponden a inertes. A partir del calor total de combustión de la mezcla, el calor proporcionado es de $9,61 \cdot 10^7$ kJ/h. [7]

El gasto de gas natural como combustible asciende a 1.622.990 euros al año.

El coste total de gas natural proporciona un valor de 8.198.465 euros al año.

4.3.2 Agua y vapor de agua

Se consume vapor de agua tanto como alimentación, junto con el gas natural, como fluido utilidad. Debido a que todo el vapor se produce a partir del calor residual del reformador R-201, solamente se contabiliza el gasto del agua, y no de la generación de vapor.

Como alimentación al proceso se utiliza agua limpia, para evitar la entrada de posibles contaminantes al interior del sistema. El precio se estima en 1,1 dólares americanos por metro cúbico [3]. En concreto, se requieren 1616,4 kmol/h de vapor, de los cuales se pueden ahorrar 664,1 kmol/h procedentes del separador de condensados S-301. En consecuencia, el coste anual de agua como materia prima asciende a 8.639,74 dólares americanos o 7.601,24 euros al año.

El vapor de agua empleado como fluido calefactor se encuentra en un circuito cerrado, con lo que no se consideran pérdidas apreciables y, como se comentó con anterioridad, se tiene en cuenta el gasto de su generación dentro de la energía a aportar en el reformador R-201.

Por otro lado, se emplea agua para enfriar en otro circuito cerrado. El coste de enfriamiento de dicha agua se estima en 0,07 dólares americanos por metro cúbico [2]. Debido a que el caudal total a enfriar es de 1172,2 m³/h, su coste asciende a 689.242,06 dólares o 606.395,16 euros al año.

4.3.3 Electricidad

El gasto energético debido a los principales equipos que la emplean para su funcionamiento se recoge en la Tabla IV.2.

Tabla IV.2. Potencia de los equipos eléctricos principales

Equipo	Potencia (kW)
K-201	201
K-202	1,5
K-301	626
P-101 A/B	0,251
P-301 A/B	567,8

Además de los consumos de estos equipos, es necesario contabilizar el gasto de otros elementos eléctricos como la instrumentación de la planta. Se estima que el consumo debido a ello en un 30 % del gasto de eléctrico recogido en la Tabla IV.2.

El precio de la electricidad para la industria en España en 2015 presenta un valor de 0,092 €/kWh. [8]

Asumiendo que dichos equipos operan las 24 horas del día durante 350 días al año, el gasto total de energía es de 13.072 MWh, lo cual supone un gasto de 1.403.029,00 euros al año.

4.4 Reemplazo de catalizadores y adsorbente

Los catalizadores se desactivan con el tiempo durante la operación normal de la planta, con lo que es necesario reemplazarlos por otros nuevos. Según la bibliografía, es necesario cambiarlos cada 3 años aproximadamente. [9]

Se estima un precio de 3 euros por kg de catalizador reemplazado.

La masa del catalizador de reactor R-201 (reformador) se determina en el Anexo III: Cálculos justificativos en la Parte A, siendo un total de 5400 kg. Las masas de los catalizadores de los reactores R-202 (HTS) y R-203 (LTS) se obtienen a partir de los volúmenes estimados en el Documento V: Presupuesto, proporcionando 86.000 kg y 94.000 kg, respectivamente.

Los costes anuales del reemplazo de catalizadores se estiman en un total de 185.400,00 euros al año.

Por otro lado, el adsorbente de los lechos del PSA también se degrada con el tiempo. Según la bibliografía, su vida útil es de alrededor de 2 o 3 años. [10]

En consecuencia, para un tiempo de vida del lecho de 2 años y medio, los costes de su reemplazo ascienden a 301.151,21 euros al año.

4.5 Costes de seguro

Se asume que el precio impuesto por la aseguradora equivale al 1 % del capital inmovilizado. [3]

En consecuencia, el coste anual es de 1.223.046,77 euros.

4.6 Costes totales

Los costes totales de producción se recogen en la Tabla IV.3 y ascienden a un total de 23.743.631,11 euros al año.

Tabla IV.3. Costes anuales de la planta de reformado de gas natural

Partida	Costes (€/año)
Personal	811.121,85
Mantenimiento	11.007.420,89
Gas natural	8.198.465,00
Agua alimento	7.601,24
Agua de refrigeración	606.395,16
Electricidad	1.403.029,00
Reemplazo catalizadores	185.400,00
Reemplazo adsorbente	301.151,21
Seguro	1.223.046,77
TOTAL	23.743.631,11

5. INGRESOS

5.1 Venta de hidrógeno producido

Se produce un total de 28.900 toneladas al año de hidrógeno con una pureza del 99,9 % y un precio de venta de 2,5 €/kg.

Las ganancias debidas a esta venta ascienden a un total de 72.250.000,00 euros al año.

6. PRÉSTAMO E INTERÉS

El préstamo concedido presenta un interés de cuotas constantes o tipo francés.

La cuota constante α_k pagada año a año se puede calcular a partir de la ecuación 6.1. [1]
[2]

$$\alpha_k = I_k + A_k \quad (6.1)$$

Donde:

α_k : término amortizado o cuota

I_k : término de interés

A_k : cuota amortización

A su vez, A_k e I_k pueden ser calculados a partir de las ecuaciones 6.2 y 6.3. [1, 2]

$$I_k = C_{k-1} \cdot i \quad (6.2)$$

$$A_k = C_{k-1} - C_k \quad (6.3)$$

Donde:

C_k : deuda pendiente o capital vivo en el año k

C_{k-1} : deuda pendiente o capital vivo en el año k-1

i: interés

Se considera que el préstamo presenta un 7 % de interés.

Al mismo tiempo, la cuota a pagar se puede obtener a partir del capital total prestado con la ecuación 6.4. [1] [2]

$$\alpha_k = \frac{C_0}{\sum_{s=1}^n (1+i)^{-s}} \quad (6.4)$$

Donde:

C_0 : capital prestado (deuda pendiente en el año 0)

n: número de cuotas a pagar

Se considera que la vida de la planta son unos 20 años y que el préstamo presenta esa duración.

En consecuencia, el capital amortizado o devuelto se calcula con la ecuación 6.5. [1, 2]

$$M_k = C_0 - C_k \quad (6.5)$$

Donde:

M_k : capital amortizado en el año k

El capital pendiente en cada momento se determina a partir de la ecuación 6.6. [1, 2]

$$C_k = \sum_{s=k+1}^n \alpha \cdot (1+i)^{-(s-k)} \quad (6.6)$$

7. BENEFICIOS ANTES DE IMPUESTOS (BAT)

Los beneficios antes de impuestos son aquellos debidos a los ingresos y costes totales de la planta sin tener en cuenta los impuestos.

Los beneficios antes de impuestos se calculan con la ecuación 7.1. [1, 2]

$$BAT_k = IT_k - CT_k - I_k - A \quad (7.1)$$

Donde:

BAT_k : beneficios antes de impuestos del año k

IT_k : ingresos totales en el año k

CT_k : costes totales en el año k

A: amortización de la planta

La amortización se considera constante y se puede calcular a partir del presupuesto total de construcción de la planta con la ecuación 7.2. [1, 2]

$$A = \frac{C_0}{n} \quad (7.2)$$

8. IMPUESTO DE SOCIEDADES

Se considera que el impuesto para sociedades es de un 35 %. [1]

La cantidad retenida debida a dichos impuestos se calcula a partir de la ecuación 8.1.

$$Impuestos_k = BAT_k \cdot 0,35 \quad (8.1)$$

9. FLUJOS DE CAJA

Los flujos de caja son la diferencia entre los beneficios antes de impuestos y la cantidad retenida por ellos. Los flujos de caja se pueden determinar con la ecuación 9.1. [1, 2]

$$F_k = BAT_k - Impuestos_k + A \quad (9.1)$$

Donde F_k es el flujo de caja en el año k

Para el año 0 se considera un flujo de caja F_0 igual a $-P$.

En la Tabla IV.4 se resume el cálculo del flujo de caja.

Tabla IV.4. Determinación de beneficio bruto, BAT, beneficio neto y flujo de caja. Fuente: adaptado de [1, 2]

Ingresos (IT_k) – gastos de producción (CT_k)
Beneficio bruto
– amortización constante (A) – intereses (I_k)
Beneficios antes de impuestos (BAT)
– impuestos ($Impuestos_k$)
Beneficio neto
+ amortización constante (A)
Flujo de caja (F_k)

10. VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El Valor Actual Neto evalúa los flujos de caja futuros generados por una inversión en el momento presente. Para calcularlo, se emplea la ecuación 10.1. [1, 2]

$$VAN = -C_0 + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+i')^j} \quad (10.1)$$

Donde:

VAN: valor actual neto

i' : tasa de actualización del dinero

Se asume un valor de la tasa de actualización del dinero del 5 %.

Para que el proyecto supere la rentabilidad exigida debe presentar un VAN positivo. Si fuera igual a cero, no se ganaría ni perdería dinero. [1, 2]

11. TASA INTERNA DE RENTABILIDAD (TIR)

La Tasa Interna de Rentabilidad se determina igualando a cero el Valor Actual Neto y expresa la máxima rentabilidad exigible al proyecto para que sea económicamente rentable. [1]

Para su cálculo, una vez igualado el VAN a cero se procede a determinar el valor de i' . El proyecto será más rentable cuanto mayor sea su valor. [1]

12.TIEMPO DE RETORNO

El tiempo de retorno, plazo de recuperación o *Pay-Back* indica el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial. [1]

Un proyecto será válido si no presenta un tiempo de retorno excesivo. Para determinarlo se busca el momento en el que el flujo de caja acumulado presenta un valor igual a cero, esto es, cuando se recupera la inversión completamente. [1]

13.RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, en las Tablas desde la IV.5 hasta la IV.8 se recogen los resultados numéricos obtenidos.

Tabla IV.5. Ingresos y costes totales y beneficio bruto esperado cada año

Año k	IT_k (€/año)	CT_k (€/año)	Beneficio Bruto (€/año)
0	-	-	-
1	72.250.000	23.743.631	48.506.369
2	72.250.000	23.743.631	48.506.369
3	72.250.000	23.743.631	48.506.369
4	72.250.000	23.743.631	48.506.369
5	72.250.000	23.743.631	48.506.369
6	72.250.000	23.743.631	48.506.369
7	72.250.000	23.743.631	48.506.369
8	72.250.000	23.743.631	48.506.369
9	72.250.000	23.743.631	48.506.369
10	72.250.000	23.743.631	48.506.369
11	72.250.000	23.743.631	48.506.369
12	72.250.000	23.743.631	48.506.369
13	72.250.000	23.743.631	48.506.369
14	72.250.000	23.743.631	48.506.369
15	72.250.000	23.743.631	48.506.369
16	72.250.000	23.743.631	48.506.369
17	72.250.000	23.743.631	48.506.369
18	72.250.000	23.743.631	48.506.369
19	72.250.000	23.743.631	48.506.369
20	72.250.000	23.743.631	48.506.369

Tabla IV.6. Variables asociadas al pago del préstamo esperado cada año

Año k	A_k (€/año)	I_k (€/año)	α_k (€/año)	C_k (€/año)	M_k (€/año)
0	-	-	-	125.966.413	-
1	3.072.689	8.817.649	11.890.338	122.893.724	3.072.689
2	3.287.778	8.602.561	11.890.338	119.605.946	6.360.467
3	3.517.922	8.372.416	11.890.338	116.088.024	9.878.389
4	3.764.177	8.126.162	11.890.338	112.323.847	13.642.566
5	4.027.669	7.862.669	11.890.338	108.296.178	17.670.235
6	4.309.606	7.580.732	11.890.338	103.986.573	21.979.840
7	4.611.278	7.279.060	11.890.338	99.375.294	26.591.119
8	4.934.068	6.956.271	11.890.338	94.441.227	31.525.186
9	5.279.452	6.610.886	11.890.338	89.161.774	36.804.639
10	5.649.014	6.241.324	11.890.338	83.512.760	42.453.653
11	6.044.445	5.845.893	11.890.338	77.468.315	48.498.098
12	6.467.556	5.422.782	11.890.338	71.000.759	54.965.654
13	6.920.285	4.970.053	11.890.338	64.080.474	61.885.939
14	7.404.705	4.485.633	11.890.338	56.675.769	69.290.644
15	7.923.034	3.967.304	11.890.338	48.752.734	77.213.678
16	8.477.647	3.412.691	11.890.338	40.275.088	85.691.325
17	9.071.082	2.819.256	11.890.338	31.204.005	94.762.407
18	9.706.058	2.184.280	11.890.338	21.497.948	104.468.465
19	10.385.482	1.504.856	11.890.338	11.112.466	114.853.947
20	11.112.466	777.873	11.890.338	0	125.966.413

Tabla IV.7. Beneficios antes de impuestos y beneficio neto esperados cada año

Año k	A (€/año)	BAT (€/año)	Impuestos_k (€/año)	Beneficio neto (€/año)
0	-	-	-	-
1	6.298.321	33.390.399	11.686.640	21.703.760
2	6.298.321	33.605.488	11.761.921	21.843.567
3	6.298.321	33.835.632	11.842.471	21.993.161
4	6.298.321	34.081.887	11.928.660	22.153.226
5	6.298.321	34.345.379	12.020.883	22.324.496
6	6.298.321	34.627.316	12.119.561	22.507.755
7	6.298.321	34.928.988	12.225.146	22.703.842
8	6.298.321	35.251.778	12.338.122	22.913.655
9	6.298.321	35.597.162	12.459.007	23.138.156
10	6.298.321	35.966.724	12.588.353	23.378.371
11	6.298.321	36.362.155	12.726.754	23.635.401
12	6.298.321	36.785.266	12.874.843	23.910.423
13	6.298.321	37.237.995	13.033.298	24.204.697
14	6.298.321	37.722.415	13.202.845	24.519.570
15	6.298.321	38.240.744	13.384.261	24.856.484
16	6.298.321	38.795.357	13.578.375	25.216.982
17	6.298.321	39.388.792	13.786.077	25.602.715
18	6.298.321	40.023.768	14.008.319	26.015.449
19	6.298.321	40.703.192	14.246.117	26.457.075
20	6.298.321	41.430.176	14.500.561	26.929.614

Tabla IV.8. Flujos de caja y de caja acumulados esperados cada año

Año k	F_k (€/año)	Flujo de caja acumulado (€/año)
0	-125.966.413	-125.966.413
1	28.002.080	-97.964.333
2	28.141.888	-69.822.445
3	28.291.481	-41.530.964
4	28.451.547	-13.079.417
5	28.622.817	15.543.400
6	28.806.076	44.349.476
7	29.002.163	73.351.639
8	29.211.976	102.563.615
9	29.436.476	132.000.091
10	29.676.691	161.676.783
11	29.933.721	191.610.504
12	30.208.744	221.819.248
13	30.503.017	252.322.265
14	30.817.890	283.140.156
15	31.154.805	314.294.960
16	31.515.303	345.810.263
17	31.901.036	377.711.298
18	32.313.770	410.025.068
19	32.755.395	442.780.463
20	33.227.935	476.008.398

En la Figura IV.2 se muestra una representación de los flujos de caja acumulados a lo largo de los años de funcionamiento de la planta.

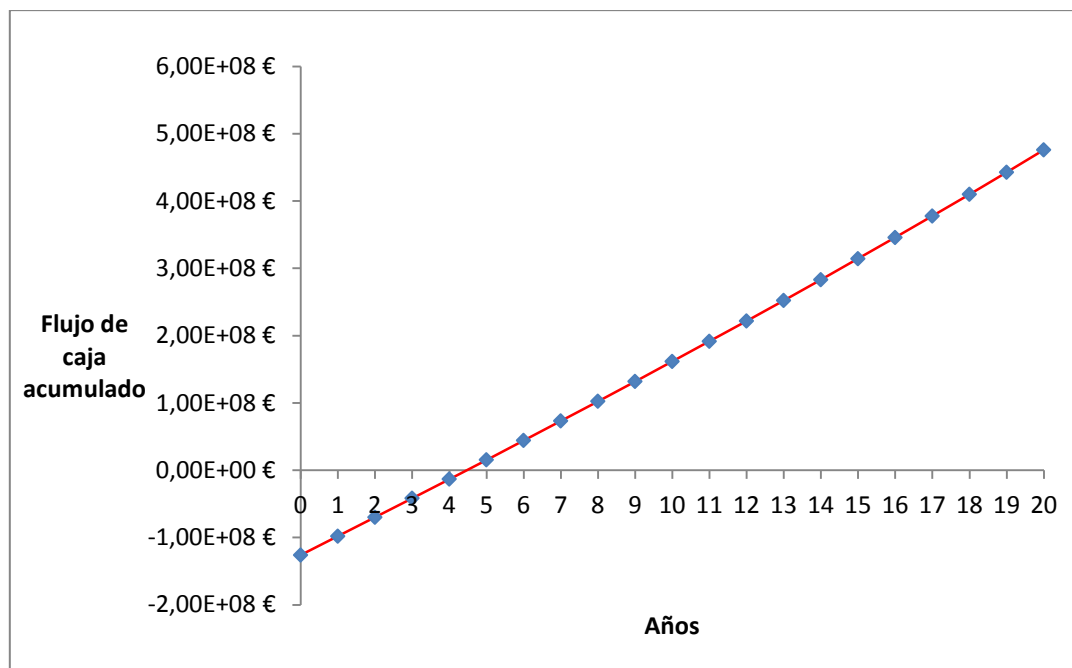


Figura IV.2. Progresión de los flujos de caja acumulados a lo largo de los años de funcionamiento de la planta

13.1 Valoración final

El Valor Actual Neto obtenido presenta un valor positivo de 243.892.533 euros, indicando que el proceso es rentable.

La Tasa Interna de Rentabilidad alcanza un resultado del 22 %, lo cual, de nuevo, indica que la planta es rentable.

El plazo de recuperación de la inversión es de 4,46 años, siendo un tiempo relativamente bajo.

En consecuencia, aplicando los tres criterios, se considera que la ejecución del proyecto es viable. Aún así, es necesario tener en cuenta que estos resultados son orientativos debido a que el objetivo del presente trabajo, en materia de diseño, se centra en el reactor R-201 y la columna C-301, reduciendo el grado exactitud de la viabilidad económica del proceso.

14.BIBLIOGRAFÍA

- [1] BREALEY, R. A., MYERS, S. C., MARCUS, A. J. *Fundamentos de Finanzas Corporativas*. 5ª edición, Madrid (España): McGraw Hill, 2007. ISBN 978-84-481-5661-9
- [2] FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, L., FERNÁNDEZ LÓPEZ, S., RODRÍGUEZ SANDÍAS, A., *La práctica de las finanzas de empresa*, 1ª edición, Madrid (España): Delta Publicaciones, 2007. ISBN 8496477622
- [3] PETERS, M. S., TIMMERHAUS, K. D., WEST, R. E. *Plant design and economics for chemical engineers*. 5ª edición, Nueva York (EE. UU.): McGraw-Hill, 2004. ISBN 978-0-07-124044-4
- [4] PAGE PERSONNEL. *Estudios de remuneración 2016 – Ingenieros y técnicos* [pdf en línea]. Page Group [consultado el 20 de junio de 2016]. Disponible en: http://www.pagepersonnel.es/sites/pagepersonnel.es/files/er_ingenieros16.pdf
- [5] INDEX MUNDI. *Gas natural Precio Mensual – Euro por Millones de BTU* [sitio web] [consultado el 20 de junio de 2016]. Disponible en: <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=gas-natural&meses=12&moneda=eur>
- [6] FERNÁNDEZ, A. *Precio metro cúbico de gas natural* [sitio web]. Preciogas [consultado el 20 de junio de 2016]. Disponible en: <http://preciogas.com/faq/precio-metro-cubico-gas-natural>
- [7] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, *NIST-JANAF Thermochemical Tables* [sitio web], [consultado el 20 de junio de 2016]. Disponible en: <http://kinetics.nist.gov/janaf/>
- [8] MINETUR. *Precio neto de la electricidad para uso doméstico y uso industrial* [pdf en línea] [consultado el 20 de junio de 2016]. Disponible en: http://www.minetur.gob.es/es-ES/IndicadoresyEstadisticas/DatosEstadisticos/IV.%20Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/I_V_12.pdf
- [9] ERTL, G., KNOZINGER, H., WEITKAMP, J., *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, Volumen 4. 1ª edición, Weinheim (Alemania): Wiley-VCH, 1997. ISBN 3-527-29212-8
- [10] McKETTA, J. J., *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*, Volumen 2, Nueva York (EE. UU.): Marcel Dekker, 1987. ISBN 0-8247-24

Anexo V.

Fichas de seguridad

Planta de Producción de Hidrógeno por

Reformado de Gas Natural

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**067A****HIDROGENO****SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa****1.1. Identificador del producto**

Nombre comercial : HIDROGENO
Descripción Química : Hidrógeno :1333-74-0 :215-605-7 :001-001-00-9
Número de registro : Figura en la lista del Anexo IV / V de REACH, exento de solicitud de registro.
Fórmula química : H2

1.2. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos aplicables identificados : Industrial y profesional. Llevar a cabo evaluación de riesgo antes de usar.
Gas de ensayo / gas de calibrado.
Uso en laboratorio.
Reacción Química (Síntesis)
Gas laser.
Usar como un combustible.
Gas de protección en procesos de soldadura.
Usar para la fabricación de componentes electrónicos/fotovoltaicos.
Para mayor información sobre su uso contactar al suministrador.
Usos desaconsejados : No inflar globos para fiestas.

1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Identificación de la Compañía : PRAXAIR ESPAÑA, S.L.U.
Orense, 11 - 5ª Planta
28020 Madrid

Dirección email (persona competente)

: contact_espana@praxair.com

1.4. Teléfono de emergencia

: (+34)914533000

: (+34)915974453

Teléfono de emergencia en Transporte Líquido (24 h)

: (+34)902213000

Instalaciones (24 h)

: (+34)917863432

Especiales (24 h)**SECCIÓN 2: Identificación de los peligros****2.1. Clasificación de la sustancia o de la mezcla****Clase y categoría de riesgo,****Código de Normativa CE****1272/2008 (CLP)****• Peligros físicos**

: Gases inflamables - Categoría 1 - Peligro - (CLP : Flam. Gas 1) - H220
Gases a presión - Gases comprimidos - Atención - (CLP : Press. Gas) - H280

Clasificación 67/548 CE o 1999/45 : CE**Clasificación CE**

: F+; R12

2.2. Elementos de la etiqueta**Normativa de Etiquetado CE****1272/2008 (CLP)****• Pictogramas de peligro**

GHS02



GHS04

• Palabra de advertencia

: Peligro

• Indicación de peligro

: H220 : Gas extremadamente inflamable.
H280 : Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.

• Consejos de prudencia**- Prevención****- Respuesta**

: P210 : Mantener alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. – No fumar.

: P377 : Fuga de gas en llamas: No apagar, salvo si la fuga puede detenerse sin peligro.

: P381 : Eliminar todas las fuentes de ignición si no hay peligro en hacerlo.

: P403 : Almacenar en un lugar bien ventilado.

- Almacenamiento**2.3. Otros peligros****Información general**

: Ninguno.

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes**3.1. Sustancia / Mezcla**

: Sustancia.

Nombre del componente

: Hidrógeno

Contenido

: 100 %

Nº CAS

: 1333-74-0

Nº EC

: 215-605-7

Nº Índice

: 001-001-00-9

Nº Reach

: Nota1

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**HIDROGENO**

Clasificación	: F+; R12 Flam. Gas 1 (H220) Press. Gas Compressed (H280)
Información general	: No contiene otros componentes o impurezas que puedan influir en la clasificación del producto. Texto completo de Frases-R, véase capítulo 16. Texto completo de declaraciones-H, véase capítulo 16.

SECCIÓN 4: Primeros auxilios**4.1. Descripción de los primeros auxilios**

- Inhalación	: Retirar a la víctima a un área no contaminada llevando colocado el equipo de respiración autónoma. Mantener a la víctima caliente y en reposo. Llamar al doctor. Aplicar la respiración artificial si se para la respiración.
- Contacto con la piel	: No se esperan efectos adversos de este producto.
- Contacto con los ojos	: No se esperan efectos adversos de este producto.
- Ingestión	: La ingestión no está considerada como una vía potencial de exposición.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Información general	: A elevadas concentraciones puede causar asfixia. Los síntomas pueden incluir la pérdida de la consciencia o de la movilidad. La víctima puede no haberse dado cuenta de la asfixia.
----------------------------	---

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Información general	: Ninguno.
----------------------------	------------

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios**5.1. Medios de extinción**

- Medios de extinción adecuados	: Agua en spray o en nebulizador. Polvo seco.
- Medios de extinción inadecuados	: No usar agua a presión para extinguirlo. Dióxido de carbono.

5.2. Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Peligros específicos	: La exposición al fuego puede causar la rotura o explosión de los recipientes.
-----------------------------	---

Productos de combustión peligrosos

: Ninguno.

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

Métodos específicos	: Si es posible detener la fuga de producto. Utilizar medidas de control de incendios apropiadas con el incendio circundante. La exposición de los envases de gas al fuego y al calor puede provocar su ruptura. Enfriar los envases dañados con chorro de agua pulverizada desde una posición protegida. No vaciar el agua contaminada por el fuego en los desagües. No extinguir una fuga de gas inflamada si no es absolutamente necesario. Se puede producir la reignición espontánea explosiva. Extinguir los otros fuegos. Usar agua en spray o en nebulizador para disipar humos de incendios.
Equipo de protección especial para extinción de incendios	: En espacios confinados utilizar equipos de respiración autónoma de presión positiva. Vestimenta y equipo de protección standard (aparato de respiración autónoma) para bomberos. Standard EN 137-máscara de cara completa que incluya un aparato de respiración autónoma de aire comprimido en circuito abierto. EN 469: Vestimenta protectora para bomberos. EN 659: Guantes de protección para bomberos.

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental**6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia**

Información general	: Intentar parar el escape/derrame. Evacuar el área. Utilizar equipos de respiración autónoma cuando entren en el área a menos que esté probado que la atmósfera es segura. Asegurar la adecuada ventilación de aire. Téngase en cuenta el riesgo de atmósferas explosivas. Eliminar las fuentes de ignición.
----------------------------	--

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente

Información general	: Intentar parar el escape/derrame.
----------------------------	-------------------------------------

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza

Información general	: Ventilar la zona.
----------------------------	---------------------

6.4. Referencia a otras secciones

Información general	: Ver también las Secciones 8 y 13.
----------------------------	-------------------------------------

SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento**7.1. Precauciones para una manipulación segura**

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**HIDROGENO****Uso seguro del producto**

- : Solo personas experimentadas y debidamente entrenadas deben manejar gases sometidos a presión. La sustancia debe ser manipulada de acuerdo con los procedimientos de buena higiene industrial y seguridad. Utilizar solo equipo específicamente apropiado para este producto y para su presión y temperatura de suministro, en caso de duda contacte con su suministrador.
 - Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.
 - Purgar el aire del sistema antes de introducir el gas.
 - Mantener lejos de fuentes de ignición, incluyendo descarga estática.
 - No fumar cuando se manipule el producto.
 - Tener en cuenta el riesgo de una posible atmosfera susceptible de explotar y la necesidad de disponer de un equipo que pruebe la explosión.
 - Considerar el uso de herramientas que no emitan chispas.
 - Comprobar que el conjunto del sistema de gas ha sido, o es con regularidad, revisado antes de usarse respecto a la posibilidad de escapes.
 - Considerar los instrumentos de reducción de la presión en las instalaciones de gas..
- Manipulación segura del envase del gas**
- : Solicitar del suministrador las instrucciones de manipulación de los contenedores.
 - Debe prevenirse la filtración de agua al interior del recipiente.
 - No permitir el retroceso hacia el interior del recipiente.
 - Proteger las botellas de los daños materiales, no arrastrar, ni rodar, deslizar ó dejar caer.
 - Si mueve botellas, incluso en pequeños recorridos, use una carretilla (mecanica, manual, etc) diseñada para transportar botellas.
 - Mantener colocada la caperuza de la valvula hasta que el envase quede fijo contra una pared, un banco ó situado en una plataforma, y ya dispuesto para su uso.
 - Si el usuario aprecia cualquier problema en una valvula de una botella en uso, termine su utilización y contacte al suministrador.
 - Nunca intentar reparar ó modificar las valvulas de los depositos ó los mecanismos de seguridad.
 - Las valvulas que estan dañadas deben ser inmediatamente comunicadas al suministrador.
 - Mantener los accesorios de la valvula del deposito libre de contaminantes, especialmente aceites y agua.
 - Reponer la caperuza de la valvula ó del depósito si se facilitan por el suministrador, siempre que el envase quede desconectado del equipo.
 - Cierre la valvula del del deposito despues de su uso y cuando quede vacio, incluso si aún esta conectado al equipo.
 - No intentar nunca trasvasar gases de una botella/envase a otro.
 - No utilizar nunca mecanismos con llamas ó de calentamiento electrico para elevar la presión del deposito.
 - No quitar ni desfigurar las etiquetas facilitadas por el suministrador para identificar el contenido de las botellas.

7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades
Información general

- : Mantener el contenedor por debajo de 50°C, en un lugar bien ventilado.
- Separa de los gases oxidantes o de otros materiales oxidantes durante el almacenamiento.
- Los contenedores ser almacenados en posición vertical y debidamente asegurados para evitar su caída.
- Los contenedores almacenados deben ser comprobados periodicamente respecto a su estado general y a posibles fugas.
- Las protecciones de las valvulas y las caperuzas deben estar colocadas.
- Almacenar los contenedores en un lugar libre del riesgo y lejos de fuentes de calor e ignición.
- Todos los equipos electricos en las areas de almacenamiento deben ser compatibles con el riesgo de una posible atmosfera explosiva.
- Observar todas las regulaciones y los requerimientos locales relativos al almacenamiento de contenedores.
- Los contenedores no deben ser almacenados en condiciones que favorezcan la corrosión.
- Mantener alejado de materiales combustibles.

7.3. Usos específicos finales
Información general

- : Ninguno.

SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual**8.1. Parámetros de control**

8.2. Controles de la exposición
Controles técnicos apropiados

- : Los sistemas sujetos a presión deben ser regularmente comprobados respecto a fugas.
- Detectores de gases deben de ser usados siempre que gases/vapores inflamables pueden ser emitidos.
- Proporcionar ventilación adecuada, general y local, a los gases de escape.
- Considerar un sistema de permisos de trabajo p.ej para trabajos de mantenimiento.

Equipo de protección personal

- : Un analisis de riesgos debe ser realizado y formalizado en cada area de trabajo para evaluar los riesgos relacionados con el uso del producto y para determinar el PPE que provoca un riesgo relevante. Estas recomendaciones deben ser tenidas en cuenta.

• Protección para el ojo/cara

- : PPE que cumplan los estandares recomendados por EN/ISO deben seleccionarse.
- : usar gafas con de seguridad con protecciones laterales.
- : Standard EN 166- Protección para el ojo.

• Protección para la piel**- Protección de las manos****- Otras**

- : Usar guantes de trabajo al manejar envases de gases.
- : Standard EN 388- guantes que protegen contra riesgos mecanicos.
- : Usar zapatos de seguridad mientras se manejan envases.
- : Considerar el uso de prendas de seguridad resistentes a llama antiestatica.
- : Standard EN ISO 20345 - Equipos de protección personal-zapatos de seguridad.
- : Estándar EN ISO 14116- Materiales que limitan la difusión de llamas.
- : Standard EN ISO 1149-5- Ropa de protección: Propiedades electrostaticas.

• Protección de las vías respiratorias

- : No necesaria.

• Peligros térmicos

- : No necesaria.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**067A****HIDROGENO****Controles de exposición medioambiental**

: No se requieren específicas medidas de gestión distintas de los procedimientos de buena higiene industrial y seguridad.

SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas**9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas**

Apariencia	: Gas.
Estado físico a 20°C / 101.3kPa	: Gas.
Color	: Incoloro.
Olor	: Inoloro.
Valor de pH	: No aplica.
Masa molecular [g/mol]	: 2
Punto de fusión [°C]	: -259
Punto de ebullición [°C]	: -253
Temperatura crítica [°C]	: -240
Punto de inflamación [°C]	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.
Velocidad de evaporación (éter=1)	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.
Rango de inflamabilidad [% de volumen en aire]	: 4 - 77
Presión de vapor [20°C]	: No aplica.
Densidad relativa del gas (aire=1)	: 0.07
Densidad relativa del líquido (agua=1)	: 0.07
Solubilidad en agua [mg/l]	: 1.6
Coefficiente de reparto n-octanol/agua [log Kow]	: No es aplicable a gases inorgánicos.
Temperatura de auto-inflamación [°C]	: 560
Viscosidad a 20°C [mPa.s]	: No aplica.
Propiedades explosivas	: No aplica.
Propiedades comburentes	: Ninguno.

9.2 Información adicional**Otros datos** : Se quema con una llama invisible.**SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad****10.1. Reactividad****Información general** : Sin riesgo de reactividad salvo lo expresado en la sub-sección más adelante.**10.2. Estabilidad química****Información general** : Estable en condiciones normales.**10.3. Posibilidad de reacciones peligrosas****Información general** : Puede formar mezclas explosivas con el aire.
Puede reaccionar violentamente con materias oxidantes.**10.4. Condiciones que deben evitarse****Información general** : Manténgase alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. – No fumar.**10.5. Materiales incompatibles****Información general** : Aire, Oxidante.
Para información complementaria sobre su compatibilidad referirse a la ISO 11114.**10.6. Productos de descomposición peligrosos****Información general** : Productos con riesgo de descomposición no se deben producir por en condiciones normales de almacenamiento y uso.**SECCIÓN 11: Información toxicológica****11.1. Información sobre los efectos toxicológicos**

Toxicidad aguda	: No se conocen los efectos toxicológicos de este producto.
Corrosión o irritación cutáneas	: Se desconocen los efectos de este producto.
Lesiones o irritación ocular graves	: Se desconocen los efectos de este producto.
Sensibilización respiratoria o cutánea	: Se desconocen los efectos de este producto.
Carcinogénesis	: Se desconocen los efectos de este producto.
Mutagenicidad	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad para la reproducción	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición única	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición repetida	: Se desconocen los efectos de este producto.
Peligro de aspiración	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.

SECCIÓN 12: Información ecológica**12.1. Toxicidad****Información general** : Este producto no causa daños ecológicos.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**067A****HIDROGENO****12.2. Persistencia y degradabilidad****Información general**

: Este producto no causa daños ecológicos.

12.3. Potencial de bioacumulación**Información general**

: Este producto no causa daños ecológicos.

12.4. Movilidad en el suelo**Información general**

: Este producto no causa daños ecológicos.

12.5. Resultados de la valoración**PBT y mPmB****Información general**

: No se clasifica como PBT o vPvB.

12.6. Otros efectos adversos**Información general**

:

Efectos sobre la capa de ozono

: Ninguno.

Produce efectos en el calentamiento global

: Se desconocen los efectos de este producto.

SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación**13.1. Métodos para el tratamiento de residuos****Información general**

: No descargar en áreas donde hay riesgo de que se forme una mezcla explosiva con el aire. El gas residual debe ser quemado a través de un quemador adecuado que disponga de antirretroceso de llama.
No descargar dentro de ningún lugar donde su acumulación pudiera ser peligrosa.
Referirse al código de prácticas de EIGA Doc 30/10 Eliminación de gases accesible en <http://www.eiga.org> para mayor información sobre métodos adecuados de vertidos.
Asegurarse de no superar los límites de emisión establecidos en regulaciones locales.
: 16 05 04: Contenedores de gases a presión (incluido halones) que contienen sustancias peligrosas.

Lista de residuos peligrosos**13.2. Información complementaria****Información general**

: Ninguno.

SECCIÓN 14: Información relativa al transporte**14.1. Número ONU****Número ONU**

: 1049

14.2. Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas**Designación oficial**

: HIDRÓGENO COMPRIMIDO

14.3. Clase(s) de peligro para el transporte**Clase(s) de peligro para el transporte**

:



2.1 : Gases inflamables

14.4. Grupo de embalaje**Código de clasificación**

: 1

F

14.5. Peligros de contaminación**Peligros para el medio ambiente****IMDG-Marine pollutant****14.6 Precauciones particulares para los usuarios****Información general**

: Evitar el transporte en los vehículos donde el espacio de la carga no esté separado del compartimiento del conductor. Asegurar que el conductor está enterado de los riesgos potenciales de la carga y que conoce que hacer en caso de un accidente o de una emergencia.
Antes de transportar las botellas :
- Asegurar una ventilación adecuada.
- Asegúrese de que los recipientes están bien fijados.
- Asegurarse que las válvulas de las botellas están cerradas y no fugan.
- Asegurarse que el tapón del acoplamiento de la válvula (cuando exista) está adecuadamente apretado.
- Asegurarse que la caperuza de la válvula o la tulipa, (cuando exista), está adecuadamente apretada.

14.7. Transporte de granel según anexo II del tratado MARPOL**73/78 y según código IBC****Información general**

: No aplica.

SECCIÓN 15: Información reglamentaria**15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla****Legislación UE**

:

Restricciones

: Ninguno.

Seveso directiva 96/82/EC

: Figura en la lista.

Legislación Nacional

:

Información general

: Asegúrese que se cumplen las normativas nacionales y locales.

HIDROGENO

15.2. Evaluación de la seguridad química

Información general

: El CSA (Análisis de Seguridad Química) no debe de realizarse para este producto.

SECCIÓN 16: Otra información

Enumeración de los cambios

: Hoja de datos de seguridad revisada de acuerdo con la regulación de la Comisión (UE) Nº453/2010.

Consejos relativos a la formación

: Asegurarse que los operarios conocen el riesgo de inflamabilidad.

: El riesgo de asfixia es a menudo despreciado y debe ser recalcado durante la formación de los operarios.

Etiquetado 67/548 CE o 1999/45 CE

• Símbolo(s)



• Frase(s) R

F+ : Extremadamente inflamable

• Frase(s) S

: R12 : Extremadamente inflamable.

: S9 : Consérvese el recipiente en lugar bien ventilado.

S16 : Conservar alejado de toda llama o fuente de chispas - No fumar.

S33 : Evítese la acumulación de cargas electroestáticas.

: R12 : Extremadamente inflamable.

Lista del texto completo de

Frases-R en la sección 3

Origen de la información

Notas

: La presente Ficha de Datos de Seguridad está establecida de acuerdo con las Directivas Europeas en vigor .

: Nota 1:

Figura en la lista del Anexo IV / V de REACH, exento de solicitud de registro.

Nota 2:

No ha expirado el plazo límite de solicitud de registro.

Nota 3:

No exige su registro. Sustancias fabricadas o importadas < 1t/y.

Otras advertencias

: Antes de utilizar el producto en un nuevo proceso o experimento, debe llevarse a cabo un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales.

Los detalles dados son ciertos y correctos en el momento de llevarse este documento a impresión.

A pesar de que durante la preparación de este documento se ha tomado especial cuidado, no se acepta ninguna responsabilidad por las lesiones o los daños resultantes.

Responsabilidades

: Estas instrucciones han sido elaboradas por Praxair sobre la base de las informaciones disponibles a la fecha de las mismas y cubren las aplicaciones más habituales, sin garantizar que su contenido sea suficiente en todos los casos y situaciones. Su observancia no excluye el cumplimiento de la normativa vigente en cada momento.

Descripción de cambios

: Adaptación a la normativa vigente.

Fin del documento

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

019

MONOXIDO DE CARBONO

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1. Identificador del producto

Nombre comercial : MONOXIDO DE CARBONO
Descripción Química : Monóxido de carbono :630-08-0 :211-128-3 :006-001-00-2
Número de registro : 01-2119480165-39-
Fórmula química : CO

1.2. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos aplicables identificados : Industrial y profesional. Llevar a cabo evaluación de riesgo antes de usar.
Gas de ensayo / gas de calibrado.
Uso en laboratorio.
Usar para tratamientos metalicos.
Reacción Química (Síntesis)
Usar para la fabricación de componentes electronicos/fotovoltaicos.
Para mayor información sobre su uso contactar al suministrador.
Usos desaconsejados : Para consumidores.

1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Identificación de la Compañía : PRAXAIR ESPAÑA, S.L.U.
Orense, 11 - 5ª Planta
28020 Madrid
Dirección email (persona competente) : contact_espana@praxair.com

1.4. Teléfono de emergencia

Teléfono (persona competente) : (+34)914533000
Teléfono de emergencia en Transporte Líquido (24 h) : (+34)915974453
Teléfono de emergencia en Instalaciones (24 h) : (+34)902213000
Teléfono de emergencia en Gases Especiales (24 h) : (+34)917863432

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

2.1. Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clase y categoría de riesgo, :
Código de Normativa CE 1272/2008 (CLP)

- **Peligros físicos** : Gases inflamables - Categoría 1 - Peligro - (CLP : Flam. Gas 1) - H220
Gases a presión - Gases comprimidos - Atención - (CLP : Press. Gas) - H280
- **Peligros para la salud** : Toxicidad aguda, por inhalación - Categoría 3 - Peligro - (CLP : Acute Tox. 3) - H331
Toxicidad para la reproducción - Feto - Categoría 1A - Peligro - (CLP : Repr. 1A) - H360D
Toxicidad específica en determinados órganos - Exposiciones repetidas - Categoría 1 - Peligro - (CLP : STOT RE 1) - H372

Clasificación 67/548 CE o 1999/45 : CE

Clasificación CE : F+; R12 Repr. Cat. 1; R61 T; R23-R48/23

2.2. Elementos de la etiqueta

Normativa de Etiquetado CE 1272/2008 (CLP)

• Pictogramas de peligro



GHS06



GHS02



GHS08



GHS04

• Palabra de advertencia

• Indicación de peligro

: Peligro
H220 : Gas extremadamente inflamable.
H280 : Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.
H331 : Tóxico en caso de inhalación.
H360U : H360 : Puede perjudicar la fertilidad o dañar al feto.
H372 : Provoca daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas.

• Consejos de prudencia

- Prevención

: P260 : No respirar el polvo, el humo, el gas, la niebla, los vapores o el aerosol.
P210 : Mantener alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. – No fumar.
P202 : No manipular la sustancia antes de haber leído y comprendido todas las instrucciones de seguridad.

- Respuesta

: P304+P340+P315 : EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar. Consulte a un médico inmediatamente.
P308+P313 : EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Consultar a un médico.
P377 : Fuga de gas en llamas: No apagar, salvo si la fuga puede detenerse sin peligro.
P381 : Eliminar todas las fuentes de ignición si no hay peligro en hacerlo.

- Almacenamiento

: P403 : Almacenar en un lugar bien ventilado.
P405 : Guardar bajo llave.

2.3. Otros peligros

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**019****MONOXIDO DE CARBONO****Información general** : Ninguno.**SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes**

3.1. Sustancia / Mezcla : Sustancia.
Nombre del componente : Monóxido de carbono
Contenido : 100 %
Nº CAS : 630-08-0
Nº EC : 211-128-3
Nº Índice : 006-001-00-2
Nº Reach : 01-2119480165-39-
Clasificación : F+; R12 Repr. Cat. 1; R61 T; R23-48/23
Flam. Gas 1 (H220) Repr. 1A (H360D) Acute Tox. 3 (H331) STOT RE 1 (H372) Press. Gas Compressed (H280)
Información general : No contiene otros componentes o impurezas que puedan influir en la clasificación del producto.
Texto completo de Frases-R, véase capítulo 16.
Texto completo de declaraciones-H, véase capítulo 16.

SECCIÓN 4: Primeros auxilios**4.1. Descripción de los primeros auxilios**

- **Inhalación** : Retirar a la víctima a un área no contaminada llevando colocado el equipo de respiración autónoma. Mantener a la víctima caliente y en reposo. Llamar al doctor. Aplicar la respiración artificial si se para la respiración.
- **Contacto con la piel** : No se esperan efectos adversos de este producto.
- **Contacto con los ojos** : No se esperan efectos adversos de este producto.
- **Ingestión** : La ingestión no está considerada como una vía potencial de exposición.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados
Información general

: Los síntomas pueden incluir vértigos, dolor de cabeza, náuseas y pérdida de coordinación.
Posibles efectos adversos retardados.
Ver la Sección 11.

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Información general : Obtener asistencia médica.
Proporcionar oxígeno.

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios**5.1. Medios de extinción**

- **Medios de extinción adecuados** : Agua en spray o en nebulizador.
Polvo seco.
- **Medios de extinción inadecuados** : No usar agua a presión para extinguirlo.
Dióxido de carbono.

5.2. Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Peligros específicos : La exposición al fuego puede causar la rotura o explosión de los recipientes.
Productos de combustión peligrosos : Ninguno.

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios
Métodos específicos

: Si es posible detener la fuga de producto.
Utilizar medidas de control de incendios apropiadas con el incendio circundante. La exposición de los envases de gas al fuego y al calor puede provocar su ruptura. Enfriar los envases dañados con chorro de agua pulverizada desde una posición protegida. No vaciar el agua contaminada por el fuego en los desagües.
No extinguir una fuga de gas inflamada si no es absolutamente necesario. Se puede producir la reignición espontánea explosiva. Extinguir los otros fuegos.
Usar agua en spray o en nebulizador para disipar humos de incendios.

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental**6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia**
Información general

: Intentar parar el escape/derrame.
Evacuar el área.
Téngase en cuenta el riesgo de atmósferas explosivas.
Eliminar las fuentes de ignición.
Vigilar la concentración de producto emitido.
Asegurar la adecuada ventilación de aire.
Utilizar equipos de respiración autónoma cuando entren en el área a menos que esté probado que la atmósfera es segura.

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente

Información general : Intentar parar el escape/derrame.

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza
Información general

: Ventilar la zona.

6.4. Referencia a otras secciones

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**019****MONOXIDO DE CARBONO****Información general** : Ver tambien las Secciones 8 y 13.**SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento****7.1. Precauciones para una manipulación segura**
Uso seguro del producto

: Solo personas experimentadas y debidamente entrenadas deben manejar gases sometidos a presión.
La sustancia debe ser manipulada de acuerdo con los procedimientos de buena higiene industrial y seguridad.
Utilizar solo equipo específicamente apropiado para este producto y para su presión y temperatura de suministro, en caso de duda contacte con su suministrador.
Evítese la exposición, recabese instrucciones especiales antes del uso.
Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.
Purgar el aire del sistema antes de introducir el gas.
Purgar el sistema con un gas inerte seco (p.ej. Helio o nitrógeno) antes de introducir el gas y también cuando el sistema no este en uso.
Mantener lejos de fuentes de ignición, incluyendo descarga estática.
No fumar cuando se manipule el producto.
Tener en cuenta el riesgo de una posible atmosfera susceptible de explotar y la necesidad de disponer de un equipo que pruebe la explosión.
Considerar el uso de herramientas que no emitan chispas.
Comprobar que el conjunto del sistema de gas ha sido, o es con regularidad, revisado antes de usarse respecto a la posibilidad de escapes.
Se recomienda la instalación de un sistema de purgado entre la botella y el regulador.
Evitar el retorno del agua, los ácidos y las bases.
Considerar los instrumentos de reducción de la presión en las instalaciones de gas..
: Solicitar del suministrador las instrucciones de manipulación de los contenedores.
Debe prevenirse la filtración de agua al interior del recipiente.
No permitir el retroceso hacia el interior del recipiente.
Proteger las botellas de los daños materiales, no arrastrar, ni rodar, deslizar ó dejar caer.
Si mueve botellas, incluso en pequeños recorridos, use una carretilla (mecánica, manual, etc) diseñada para transportar botellas.
Mantener colocada la caperuza de la válvula hasta que el envase quede fijo contra una pared, un banco ó situado en una plataforma, y ya dispuesto para su uso.
Si el usuario aprecia cualquier problema en una válvula de una botella en uso, termine su utilización y contacte al suministrador.
Nunca intentar reparar ó modificar las válvulas de los depósitos ó los mecanismos de seguridad.
Las válvulas que están dañadas deben ser inmediatamente comunicadas al suministrador.
Mantener los accesorios de la válvula del depósito libre de contaminantes, especialmente aceites y agua.
Reponer la caperuza de la válvula ó del depósito si se facilitan por el suministrador, siempre que el envase quede desconectado del equipo.
Cierre la válvula del depósito después de su uso y cuando quede vacío, incluso si aún esta conectado al equipo.
No intentar nunca trasvasar gases de una botella/envase a otro.
No utilizar nunca mecanismos con llamas ó de calentamiento eléctrico para elevar la presión del depósito.
No quitar ni desfigurar las etiquetas facilitadas por el suministrador para identificar el contenido de las botellas.

Manipulación segura del envase del gas**7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades**
Información general

: Mantener el contenedor por debajo de 50°C, en un lugar bien ventilado.
Separa de los gases oxidantes o de otros materiales oxidantes durante el almacenamiento.
Los contenedores ser almacenados en posición vertical y debidamente asegurados para evitar su caída.
Los contenedores almacenados deben ser comprobados periódicamente respecto a su estado general y a posibles fugas.
Las protecciones de las válvulas y las caperuzas deben estar colocadas.
Almacenar los contenedores en un lugar libre del riesgo y lejos de fuentes de calor e ignición.
Todos los equipos eléctricos en las áreas de almacenamiento deben ser compatibles con el riesgo de una posible atmosfera explosiva.
Observar todas las regulaciones y los requerimientos locales relativos al almacenamiento de contenedores.
Los contenedores no deben ser almacenados en condiciones que favorezcan la corrosión.
Mantener alejado de materiales combustibles.

7.3. Usos específicos finales
Información general

: Ninguno.

SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual**8.1. Parámetros de control****Límites de exposición profesional**

: Monóxido de carbono : VLA-ED España [ppm] : 25
Monóxido de carbono : VLA-ED España [mg/m³] : 29

DNEL Nivel sin efectos derivados (trabajadores)

: Monóxido de carbono : Inhalación de corta duración (local) (ppm) para DNEL : 100
Monóxido de carbono : Inhalación de corta duración (sistémica) (ppm) para DNEL : 100
Monóxido de carbono : Inhalación de larga duración (local) (ppm) para DNEL : 20
Monóxido de carbono : Inhalación de larga duración (sistémica) (ppm) para DNEL : 20

8.2. Controles de la exposición

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**019****MONOXIDO DE CARBONO**

Controles técnicos apropiados	: Producto que debe ser manipulado en el contexto de un sistema cerrado y bajo estrictas condiciones de control. Usar preferiblemente solo en instalaciones selladas contra fugas permanentemente (Por ej. tuberías soldadas) Mantener la concentración por debajo de los límites de concentración admitido para profesionales. Considerar un sistema de permisos de trabajo p.ej para trabajos de mantenimiento. Los sistemas sujetos a presión deben ser regularmente comprobados respecto a fugas. Proporcionar ventilación adecuada, general y local, a los gases de escape. Deben ser usados detectores de alarma cuando puedan desprenderse gases tóxicos.
Equipo de protección personal	: Un análisis de riesgos debe ser realizado y formalizado en cada área de trabajo para evaluar los riesgos relacionados con el uso del producto y para determinar el PPE que provoca un riesgo relevante. Estas recomendaciones deben ser tenidas en cuenta. PPE que cumplan los estándares recomendados por EN/ISO deben seleccionarse.
• Protección para el ojo/cara	: usar gafas con de seguridad con protecciones laterales. Standard EN 166- Protección para el ojo.
• Protección para la piel	:
- Protección de las manos	: Usar guantes de trabajo al manejar envases de gases. Standard EN 388- guantes que protegen contra riesgos mecánicos.
- Otras	: Usar zapatos de seguridad mientras se manejan envases. Considerar el uso de prendas de seguridad resistentes a llama antiestática. Standard EN ISO 20345 - Equipos de protección personal-zapatos de seguridad. Estándar EN ISO 14116- Materiales que limitan la difusión de llamas. Standard EN ISO 1149-5- Ropa de protección: Propiedades electrostáticas.
• Protección de las vías respiratorias	: Trabajando con esta sustancia no utilizar nunca ningún tipo de equipo con filtro para el sistema respiratorio debido a que no disponen de propiedades de advertencia. Disponer de aparato de respiración autónomo para uso en caso de emergencia. Standard EN 137-máscara de cara completa que incluya un aparato de respiración autónomo de aire comprimido en circuito abierto. Se recomienda un sistema de respiración autónoma, en caso de que pueda producirse una exposición a algo no conocido, por ej. Al efectuar operaciones de mantenimiento de instalaciones .
• Peligros térmicos	: No necesaria.
Controles de exposición medioambiental	: Tener en cuenta las regulaciones locales relativas a las restricciones de emisiones a la atmósfera. Ver sección 13 para métodos específicos de tratamiento de residuos de gases.

SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas**9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas**

Apariencia	: Gas.
Estado físico a 20°C / 101.3kPa	: Gas.
Color	: Incoloro.
Olor	: Inoloro.
Umbral olfativo	: La superación de límites por el olor es subjetiva e inadecuado para advertir del riesgo de sobrecarga.
Valor de pH	: No aplica.
Masa molecular [g/mol]	: 28
Punto de fusión [°C]	: -205
Punto de ebullición [°C]	: -192
Temperatura crítica [°C]	: -140
Punto de inflamación [°C]	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.
Velocidad de evaporación (éter=1)	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.
Rango de inflamabilidad [% de volumen en aire]	: 10.9 - 76
Presión de vapor [20°C]	: No aplica.
Densidad relativa del gas (aire=1)	: 1
Densidad relativa del líquido (agua=1)	: 0.79
Solubilidad en agua [mg/l]	: 30
Coefficiente de reparto n-octanol/agua [log Kow]	: 1.78
Temperatura de auto-inflamación [°C]	: 620
Viscosidad a 20°C [mPa.s]	: No aplica.
Propiedades explosivas	: No aplica.
Propiedades comburentes	: Ninguno.
9.2 Información adicional	
Otros datos	: Ninguno.

SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

10.1. Reactividad	
Información general	: Sin riesgo de reactividad salvo lo expresado en la sub-sección más adelante.
10.2. Estabilidad química	
Información general	: Estable en condiciones normales.
10.3. Posibilidad de reacciones peligrosas	
Información general	: Puede formar mezclas explosivas con el aire. Puede reaccionar violentamente con materias oxidantes.

MONOXIDO DE CARBONO

10.4. Condiciones que deben evitarse

Información general

: Manténgase alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. – No fumar.

10.5. Materiales incompatibles

Información general

: Aire, Oxidante.

Para información complementaria sobre su compatibilidad referirse a la ISO 11114.

10.6. Productos de descomposición peligrosos

Información general

: Productos con riesgo de descomposición no se deben producir por en condiciones normales de almacenamiento y uso.

SECCIÓN 11: Información toxicológica

11.1. Información sobre los efectos toxicológicos

Toxicidad aguda

: Tóxico por inhalación.

LC50 por inhalación en rata [ppm/4h]

: 1300

LC50 [ppm/1h]

: 3760 (ADR P200 / ISO 10298)

Corrosión o irritación cutáneas

: Se desconocen los efectos de este producto.

Lesiones o irritación ocular graves

: Se desconocen los efectos de este producto.

Sensibilización respiratoria o cutánea

: Se desconocen los efectos de este producto.

Carcinogénesis

: Se desconocen los efectos de este producto.

Mutagenicidad

: Se desconocen los efectos de este producto.

Toxicidad para la reproducción

: Puede dañar la fertilidad y causar daños a los fetos.

Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición única

: Suprime el oxígeno fijado en los glóbulos rojos.

Órganos diana

:

Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición repetida

: H372 : Provoca daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas.

Órganos diana

:

Peligro de aspiración

: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.

SECCIÓN 12: Información ecológica

12.1. Toxicidad

EC50 48 Horas - Daphnia magna [mg/l]

: Estudio científicamente injustificado.

EC50 72h Algae [mg/l]

: Estudio científicamente injustificado.

LC50-96 Horas en pez [mg/l]

: Estudio científicamente injustificado.

12.2. Persistencia y degradabilidad

Información general

: No supera la hidrólisis.
No es rápidamente biodegradable.

12.3. Potencial de bioacumulación

Información general

: No es susceptible de bioacumulación debido a un bajo log Kow (log Kow <4)
Referirlo a la sección 9.

12.4. Movilidad en el suelo

Información general

: Debido a su alta volatilidad el producto es difícil que cause contaminación al suelo o al agua.

12.5. Resultados de la valoración PBT y mPvB

Información general

: No se clasifica como PBT o vPvB.

12.6. Otros efectos adversos

Información general

:

Efectos sobre la capa de ozono

: Ninguno.

Factor de calentamiento global [CO2=1]

: 1.9

SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación

13.1. Métodos para el tratamiento de residuos

Información general

: Necesidad no ser descargado a la atmósfera.
Referirse al código de prácticas de EIGA Doc 30/10 Eliminación de gases accesible en <http://www.eiga.org> para mayor información sobre métodos adecuados de vertidos.
Contactar con el suministrador si se necesita orientación.
Asegurarse de no superar los límites de emisión establecidos en regulaciones locales.
16 05 04: Contenedores de gases a presión (incluido halones) que contienen sustancias peligrosas.

Lista de residuos peligrosos

13.2. Información complementaria

Información general

: Ninguno.

SECCIÓN 14: Información relativa al transporte

14.1. Número ONU

Número ONU

: 1016

14.2. Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas

Designación oficial

: MONOXIDO DE CARBONO COMPRIMIDO

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

019

MONOXIDO DE CARBONO

14.3. Clase(s) de peligro para el transporte

Clase(s) de peligro para el transporte


2.3 : Gases tóxicos
(2.1 : Gases inflamables)

14.4. Grupo de embalaje Código de clasificación

: 1
TF

14.5. Peligros de contaminación Peligros para el medio ambiente IMDG-Marine pollutant

: Ninguno.
: No

14.6 Precauciones particulares para los usuarios Información general

: Evitar el transporte en los vehículos donde el espacio de la carga no esté separado del compartimiento del conductor.
Asegurar que el conductor está enterado de los riesgos potenciales de la carga y que conoce que hacer en caso de un accidente o de una emergencia.
Antes de transportar las botellas :
- Asegurar una ventilación adecuada.
- Asegúrese de que los recipientes están bien fijados.
- Asegurarse que las válvulas de las botellas están cerradas y no fugan.
- Asegurarse que el tapón del acoplamiento de la válvula (cuando exista) está adecuadamente apretado.
- Asegurarse que la caperuza de la válvula o la tulipa, (cuando exista), está adecuadamente apretada.

14.7. Transporte de granel según anexo II del tratado MARPOL 73/78 y según código IBC Información general

: No aplica.

SECCIÓN 15: Información reglamentaria

15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

Legislación UE

:

Restricciones

: Reservado para uso profesional (Anexo VII REACH)

Seveso directiva 96/82/EC

: Cubierto.

Legislación Nacional

:

Información general

: Asegúrese que se cumplen las normativas nacionales y locales.

15.2.Evaluación de la seguridad química

Información general

: El CSA (Análisis de Seguridad Química) ha sido realizado para este producto.

SECCIÓN 16: Otra información

Enumeración de los cambios

: Hoja de datos de seguridad revisada de acuerdo con la regulación de la Comisión (UE) Nº453/2010.

Consejos relativos a la formación

: Asegurarse que los operarios conocen el riesgo de inflamabilidad.
Los usuarios de los aparatos de respiración deben ser entrenados.
Asegurarse que los operarios comprenden los riesgos de toxicidad.

Etiquetado 67/548 CE o 1999/45 CE

• Símbolo(s)


F+ : Extremadamente inflamable
T : Tóxico

• Frase(s) R

: R61 : Riesgo durante el embarazo de efectos adversos para el feto.
R12 : Extremadamente inflamable.
R23 : Tóxico por inhalación.

• Frase(s) S

: R48/23 : Tóxico : riesgo de efectos graves para la salud en caso de exposición prolongada por inhalación.
S45 : En caso de accidente o malestar, acúdase inmediatamente al médico (si es posible, muéstrele la etiqueta).
S53 : Evítese la exposición - recábense instrucciones especiales antes del uso.

Lista del texto completo de Frases-R en la sección 3

: R12 : Extremadamente inflamable. R23 : Tóxico por inhalación. R48/23 : Tóxico : riesgo de efectos graves para la salud en caso de exposición prolongada por inhalación. R61 : Riesgo durante el embarazo de efectos adversos para el feto.

Origen de la información Notas

: La presente Ficha de Datos de Seguridad está establecida de acuerdo con las Directivas Europeas en vigor .
: Nota 1:
Figura en la lista del Anexo IV / V de REACH, exento de solicitud de registro.
Nota 2:
No ha expirado el plazo límite de solicitud de registro.
Nota 3:
No exige su registro.Sustancias fabricadas o importadas<1t/y.



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Página: 7 / 7

Versión: 2

Fecha de Emisión: 10/02/2011

Fecha de Revisión: 13/11/2013

Número de FDS:

019

MONOXIDO DE CARBONO

Otras advertencias

: A pesar de que durante la preparación de este documento se ha tomado especial cuidado, no se acepta ninguna responsabilidad por las lesiones o los daños resultantes.

Los detalles dados son ciertos y correctos en el momento de llevarse este documento a impresión.

Antes de utilizar el producto en un nuevo proceso o experimento, debe llevarse a cabo un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales.

Responsabilidades

: Estas instrucciones han sido elaboradas por Praxair sobre la base de las informaciones disponibles a la fecha de las mismas y cubren las aplicaciones más habituales, sin garantizar que su contenido sea suficiente en todos los casos y situaciones. Su observancia no excluye el cumplimiento de la normativa vigente en cada momento.

Descripción de cambios

: Adaptación a la normativa vigente.

Fin del documento

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**018A****DIOXIDO DE CARBONO****SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa****1.1. Identificador del producto**

Nombre comercial : DIOXIDO DE CARBONO
Descripción Química : Dióxido de carbono :124-38-9 :204-696-9 :---
Número de registro : Figura en la lista del Anexo IV / V de REACH, exento de solicitud de registro.
Fórmula química : CO₂

1.2. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos aplicables identificados : Industrial y profesional. Llevar a cabo evaluación de riesgo antes de usar.
Gas de ensayo / gas de calibrado.
Purgado.
Uso en laboratorio.
Gas de protección en procesos de soldadura.
Usar para la fabricación de componentes electrónicos/fotovoltaicos.
Para mayor información sobre su uso contactar al suministrador.

1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Identificación de la Compañía : PRAXAIR ESPAÑA, S.L.U.
Orense, 11 - 5ª Planta
28020 Madrid
Dirección email (persona competente) : contact_espana@praxair.com

1.4. Teléfono de emergencia

Teléfono (persona competente) : (+34)914533000
Teléfono de emergencia en Transporte Líquido (24 h) : (+34)915974453
Teléfono de emergencia en Instalaciones (24 h) : (+34)902213000
Teléfono de emergencia en Gases Especiales (24 h) : (+34)917863432

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros**2.1. Clasificación de la sustancia o de la mezcla**

Clase y categoría de riesgo, Código de Normativa CE :
1272/2008 (CLP)
• Peligros físicos : Gases a presión - Gases licuados - Atención - (CLP : Press. Gas) - H280
Clasificación 67/548 CE o 1999/45 CE :
Clasificación CE : No clasificada como sustancia / mezcla peligrosa.
No incluido en el anexo VI.
No requiere etiquetado CE.

2.2. Elementos de la etiqueta

Normativa de Etiquetado CE :
1272/2008 (CLP)

• Pictogramas de peligro

GHS04

• Palabra de advertencia : Atención
• Indicación de peligro : H280 : Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.
• Consejos de prudencia :
- Almacenamiento : P403 : Almacenar en un lugar bien ventilado.

2.3. Otros peligros

Información general : Asfixiante a altas concentraciones.
El contacto con el líquido puede causar quemaduras por frío o congelación.

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes**3.1. Sustancia / Mezcla**

Nombre del componente : Sustancia.
Contenido : Dióxido de carbono
: 100 %
Nº CAS : 124-38-9
Nº EC : 204-696-9
Nº Índice : ----
Nº Reach : Nota1
Clasificación : No clasificado (DSD)
Press. Gas Liquefied (H280)
Información general : No contiene otros componentes o impurezas que puedan influir en la clasificación del producto.
Texto completo de Frases-R, véase capítulo 16.
Texto completo de declaraciones-H, véase capítulo 16.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**018A****DIOXIDO DE CARBONO****SECCIÓN 4: Primeros auxilios****4.1. Descripción de los primeros auxilios****- Inhalación**

: Retirar a la víctima a un área no contaminada llevando colocado el equipo de respiración autónoma. Mantener a la víctima caliente y en reposo. Llamar al doctor. Aplicar la respiración artificial si se para la respiración.

- Contacto con la piel

: En caso de congelación rociar con agua durante 15 minutos. Aplicar un vendaje estéril. Obtener asistencia médica.

- Contacto con los ojos

: Lavar inmediatamente los ojos con agua durante, al menos, 15 minutos.

- Ingestión

: La ingestión no está considerada como una vía potencial de exposición.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados**Información general**

: A elevadas concentraciones puede causar asfixia. Los síntomas pueden incluir la pérdida de la consciencia o de la movilidad. La víctima puede no haberse dado cuenta de la asfixia.

Concentraciones pequeñas de CO2 provocan aumento de la frecuencia respiratoria y dolor de cabeza.

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente**Información general**

: Ninguno.

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios**5.1. Medios de extinción****- Medios de extinción adecuados**

: Agua en spray o en nebulizador.

- Medios de extinción inadecuados

: No usar agua a presión para extinguirlo.

5.2. Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla**Peligros específicos**

: La exposición al fuego puede causar la rotura o explosión de los recipientes.

Productos de combustión

: Ninguno.

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios**Métodos específicos**

: Utilizar medidas de control de incendios apropiadas con el incendio circundante. La exposición de los envases de gas al fuego y al calor puede provocar su ruptura. Enfriar los envases dañados con chorro de agua pulverizada desde una posición protegida. No vaciar el agua contaminada por el fuego en los desagües. Si es posible detener la fuga de producto.

Usar agua en spray o en nebulizador para disipar humos de incendios.

Equipo de protección especial para extinción de incendios

: Utilizar equipos de respiración autónoma de presión positiva.

Vestimenta y equipo de protección standard (aparato de respiración autónoma) para bomberos.

Standard EN 137-máscara de cara completa que incluya un aparato de respiración autónoma de aire comprimido en circuito abierto.

EN 469: Vestimenta protectora para bomberos. EN 659: Guantes de protección para bomberos.

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental**6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia****Información general**

: Intentar parar el escape/derrame.

Evacuar el área.

Utilizar equipos de respiración autónoma cuando entren en el área a menos que esté probado que la atmósfera es segura.

Asegurar la adecuada ventilación de aire.

Prevenir la entrada en alcantarillas, sótanos, fosos de trabajo o en cualquier otro lugar donde la acumulación pueda ser peligrosa.

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente**Información general**

: Intentar parar el escape/derrame.

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza**Información general**

: Ventilar la zona.

6.4. Referencia a otras secciones**Información general**

: Ver también las Secciones 8 y 13.

SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento**7.1. Precauciones para una manipulación segura****Uso seguro del producto**

: Solo personas experimentadas y debidamente entrenadas deben manejar gases sometidos a presión.

La sustancia debe ser manipulada de acuerdo con los procedimientos de buena higiene industrial y seguridad.

Utilizar solo equipo específicamente apropiado para este producto y para su presión y temperatura de suministro, en caso de duda contacte con su suministrador.

No fumar cuando se manipule el producto.

Comprobar que el conjunto del sistema de gas ha sido, o es con regularidad, revisado antes de usarse respecto a la posibilidad de escapes.

Evitar el retorno del agua, los ácidos y las bases.

Considerar los instrumentos de reducción de la presión en las instalaciones de gas..

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**018A****DIOXIDO DE CARBONO****Manipulación segura del envase del gas**

- : Solicitar del suministrador las instrucciones de manipulación de los contenedores.
- No permitir el retroceso hacia el interior del recipiente.
- Proteger las botellas de los daños materiales, no arrastrar, ni rodar, deslizar ó dejar caer.
- Si mueve botellas, incluso en pequeños recorridos, use una carretilla (mecánica, manual, etc) diseñada para transportar botellas.
- Mantener colocada la caperuza de la válvula hasta que el envase quede fijo contra una pared, un banco ó situado en una plataforma, y ya dispuesto para su uso.
- Si el usuario aprecia cualquier problema en una válvula de una botella en uso, termine su utilización y contacte al suministrador.
- Nunca intentar reparar ó modificar las válvulas de los depósitos ó los mecanismos de seguridad.
- Las válvulas que están dañadas deben ser inmediatamente comunicadas al suministrador.
- Mantener los accesorios de la válvula del depósito libre de contaminantes, especialmente aceites y agua.
- Reponer la caperuza de la válvula ó del depósito si se facilitan por el suministrador, siempre que el envase quede desconectado del equipo.
- Cierre la válvula del depósito después de su uso y cuando quede vacío, incluso si aún está conectado al equipo.
- No intentar nunca trasvasar gases de una botella/envase a otro.
- No utilizar nunca mecanismos con llamas ó de calentamiento eléctrico para elevar la presión del depósito.
- No quitar ni desfigurar las etiquetas facilitadas por el suministrador para identificar el contenido de las botellas.

7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades
Información general

- : Mantener el contenedor por debajo de 50°C, en un lugar bien ventilado.
- Los contenedores ser almacenados en posición vertical y debidamente asegurados para evitar su caída.
- Los contenedores almacenados deben ser comprobados periódicamente respecto a su estado general y a posibles fugas.
- Las protecciones de las válvulas y las caperuzas deben estar colocadas.
- Almacenar los contenedores en un lugar libre del riesgo y lejos de fuentes de calor e ignición.
- Observar todas las regulaciones y los requerimientos locales relativos al almacenamiento de contenedores.
- Los contenedores no deben ser almacenados en condiciones que favorezcan la corrosión.
- Mantener alejado de materiales combustibles.

7.3. Usos específicos finales
Información general

- : Ninguno.

SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual**8.1. Parámetros de control**

- Límites de exposición profesional**
- : Dióxido de carbono : VLA-ED España [ppm] : 5000
 - : Dióxido de carbono : VLA-ED España [mg/m³] : 9150

8.2. Controles de la exposición
Controles técnicos apropiados

- : Detectores de oxígeno deben usarse cuando gases asfixiantes pueden ser emitidos.
- Considerar un sistema de permisos de trabajo p.ej para trabajos de mantenimiento.
- Los sistemas sujetos a presión deben ser regularmente comprobados respecto a fugas.
- Mantener la concentración por debajo de los límites de concentración admitido para profesionales.
- Proporcionar ventilación adecuada, general y local, a los gases de escape.

Equipo de protección personal

- : Un análisis de riesgos debe ser realizado y formalizado en cada área de trabajo para evaluar los riesgos relacionados con el uso del producto y para determinar el PPE que provoca un riesgo relevante. Estas recomendaciones deben ser tenidas en cuenta.
- PPE que cumplan los estándares recomendados por EN/ISO deben seleccionarse.

• Protección para el ojo/cara

- : usar gafas con de seguridad con protecciones laterales.
- usar gafas de seguridad con protecciones laterales o gafas cerradas sobre los ojos al hacer trasvases o al efectuar desconexiones.
- Standard EN 166- Protección para el ojo.

• Protección para la piel
- Protección de las manos

- : Usar guantes de trabajo al manejar envases de gases.
- Standard EN 388- guantes que protegen contra riesgos mecánicos.

- Otras

- : Usar zapatos de seguridad mientras se manejan envases.
- Standard EN ISO 20345 - Equipos de protección personal- zapatos de seguridad.

• Protección de las vías respiratorias

- : Un aparato de respiración asistida (SCBA) o una máscara con una vía de aire a presión tienen que usarse en atmósferas con insuficiente oxígeno.
- Standard EN 137- máscara de cara completa que incluya un aparato de respiración autónomo de aire comprimido en circuito abierto.

• Peligros térmicos
Controles de exposición medioambiental

- : No necesaria.
- : No necesaria.

SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas**9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas**

- Apariencia** : Gas.
- Estado físico a 20°C / 101.3kPa** : Gas.
- Color** : Incoloro.
- Olor** : Sin olor que advierta de sus propiedades.
- Umbral olfativo** : La superación de límites por el olor es subjetiva e inadecuado para advertir del riesgo de sobrecarga.
- Valor de pH** : No aplica.
- Masa molecular [g/mol]** : 44

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**018A****DIOXIDO DE CARBONO**

Punto de fusión [°C]	: -78.5
Punto de ebullición [°C]	: -56.6 (s)
Temperatura crítica [°C]	: 30
Punto de inflamación [°C]	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.
Velocidad de evaporación (éter=1)	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.
Rango de inflamabilidad [% de volumen en aire]	: No inflamable.
Presión de vapor [20°C]	: 57.3 bar
Densidad relativa del gas (aire=1)	: 1.52
Densidad relativa del líquido (agua=1)	: 0.82
Solubilidad en agua [mg/l]	: 2000 Completamente soluble.
Coefficiente de reparto n-octanol/agua [log Kow]	: 0.83
Temperatura de auto-inflamación [°C]	: No aplica.
Viscosidad a 20°C [mPa.s]	: No aplica.
Propiedades explosivas	: No aplica.
Propiedades comburentes	: Ninguno.
9.2 Información adicional	
Otros datos	: El vapor es mas pesado que el aire. Puede acumularse en espacios confinados, particularmente al nivel del suelo o en sótanos.

SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

10.1. Reactividad	
Información general	: Sin riesgo de reactividad salvo lo expresado en la sub-sección mas adelante.
10.2. Estabilidad química	
Información general	: Estable en condiciones normales.
10.3. Posibilidad de reacciones peligrosas	
Información general	: Ninguno.
10.4. Condiciones que deben evitarse	
Información general	: Nunca por debajo de las condiciones de manejo y almacenamiento (ver sección 7)
10.5. Materiales incompatibles	
Información general	: Ninguno. Para información complementaria sobre su compatibilidad referirse a la ISO 11114.
10.6. Productos de descomposición peligrosos	
Información general	: Ninguno.

SECCIÓN 11: Información toxicológica

11.1. Información sobre los efectos toxicológicos	
Toxicidad aguda	: A elevadas concentraciones producen una rápida insuficiencia circulatoria. Los síntomas son dolor de cabeza, nauseas y vómitos, los cuales pueden conducir a la inconsciencia.
Corrosión o irritación cutáneas	: Se desconocen los efectos de este producto.
Lesiones o irritación ocular graves	: Se desconocen los efectos de este producto.
Sensibilización respiratoria o cutánea	: Se desconocen los efectos de este producto.
Carcinogénesis	: Se desconocen los efectos de este producto.
Mutagenicidad	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad para la reproducción	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición única	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición repetida	: Se desconocen los efectos de este producto.
Peligro de aspiración	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.

SECCIÓN 12: Información ecológica

12.1. Toxicidad	
Información general	: Este producto no causa daños ecológicos.
12.2. Persistencia y degradabilidad	
Información general	: Este producto no causa daños ecológicos.
12.3. Potencial de bioacumulación	
Información general	: Este producto no causa daños ecológicos.
12.4. Movilidad en el suelo	
Información general	: Este producto no causa daños ecológicos.
12.5. Resultados de la valoración PBT y mPmB	
Información general	: No se clasifica como PBT o vPvB.
12.6. Otros efectos adversos	
Información general	:

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**018A****DIOXIDO DE CARBONO**

Efectos sobre la capa de ozono : Ninguno.
Factor de calentamiento global : 1
[CO₂=1]
Produce efectos en el calentamiento global : Cuando se descarga en grandes cantidades puede contribuir al efecto invernadero.

SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación**13.1. Métodos para el tratamiento de residuos**

Información general : No descargar dentro de ningún lugar donde su acumulación pudiera ser peligrosa.
Puede ser liberado a la atmósfera en un lugar bien ventilado.
Se debe evitar descargar a la atmósfera en grandes cantidades.

Lista de residuos peligrosos : 16 05 05: Contenedores de gases a presión distintos de los mencionados en 16 05 04.

13.2. Información complementaria

Información general : Ninguno.

SECCIÓN 14: Información relativa al transporte**14.1. Número ONU**

Número ONU : 1013

14.2. Designación oficial de**transporte de las Naciones Unidas**

Designación oficial : DIOXIDO DE CARBONO

14.3. Clase(s) de peligro para el transporte

Clase(s) de peligro para el transporte :



2.2 : Gases no inflamables, no tóxicos

14.4. Grupo de embalaje

Código de clasificación : 2
A

14.5. Peligros de contaminación

Peligros para el medio ambiente : Ninguno.

IMDG-Marine pollutant : No

14.6 Precauciones particulares para los usuarios

Información general : Evitar el transporte en los vehículos donde el espacio de la carga no esté separado del compartimiento del conductor.
Asegurar que el conductor está enterado de los riesgos potenciales de la carga y que conoce que hacer en caso de un accidente o de una emergencia.
Antes de transportar las botellas :
- Asegurar una ventilación adecuada.
- Asegúrese de que los recipientes están bien fijados.
- Asegurarse que las válvulas de las botellas están cerradas y no fugan.
- Asegurarse que el tapón del acoplamiento de la válvula (cuando exista) está adecuadamente apretado.
- Asegurarse que la caperuza de la válvula o la tulipa, (cuando exista), está adecuadamente apretada.

14.7. Transporte de granel según anexo II del tratado MARPOL 73/78 y según código IBC

Información general : No aplica.

SECCIÓN 15: Información reglamentaria**15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla**

Legislación UE :
Restricciones : Ninguno.

Seveso directiva 96/82/EC : No está cubierto.

Legislación Nacional :

Información general : Asegúrese que se cumplen las normativas nacionales y locales.

15.2. Evaluación de la seguridad química

Información general : El CSA (Análisis de Seguridad Química) no debe de realizarse para este producto.

SECCIÓN 16: Otra información

Enumeración de los cambios : Hoja de datos de seguridad revisada de acuerdo con la regulación de la Comisión (UE) N°453/2010.

Consejos relativos a la formación : El riesgo de asfixia es a menudo despreciado y debe ser recalado durante la formación de los operarios.

Etiquetado 67/548 CE o 1999/45 CE :

• **Símbolo(s)** : Ninguno.

• **Frase(s) R** : Ninguno.

• **Frase(s) S** : Ninguno.

Origen de la información : La presente Ficha de Datos de Seguridad está establecida de acuerdo con las Directivas Europeas en vigor .



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Página: 6 / 6

Versión: 5

Fecha de Emisión: 07/05/2013

Fecha de Revisión: 13/11/2013

Número de FDS:

018A

DIOXIDO DE CARBONO

Notas

- : Nota 1:
Figura en la lista del Anexo IV / V de REACH, exento de solicitud de registro.
- : Nota 2:
No ha expirado el plazo límite de solicitud de registro.
- : Nota 3:
No exige su registro. Sustancias fabricadas o importadas < 1t/y.

Otras advertencias

- : A pesar de que durante la preparación de este documento se ha tomado especial cuidado, no se acepta ninguna responsabilidad por las lesiones o los daños resultantes.
Los detalles dados son ciertos y correctos en el momento de llevarse este documento a impresión.
Antes de utilizar el producto en un nuevo proceso o experimento, debe llevarse a cabo un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales.

Responsabilidades

- : Estas instrucciones han sido elaboradas por Praxair sobre la base de las informaciones disponibles a la fecha de las mismas y cubren las aplicaciones más habituales, sin garantizar que su contenido sea suficiente en todos los casos y situaciones. Su observancia no excluye el cumplimiento de la normativa vigente en cada momento.

Descripción de cambios

- : Adaptación a la normativa vigente.

Fin del documento

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

073

SULFURO DE HIDROGENO

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1. Identificador del producto

Nombre comercial : SULFURO DE HIDROGENO
Descripción Química : sulfuro de hidrógeno :7783-06-4 :231-977-3 :016-001-00-4
Número de registro : No ha expirado el plazo límite de solicitud de registro.
Fórmula química : H₂S

1.2. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos aplicables identificados : Industrial y profesional. Llevar a cabo evaluación de riesgo antes de usar.
Gas de ensayo / gas de calibrado.
Uso en laboratorio.
Usar para la fabricación de componentes electrónicos/fotovoltaicos.
Para mayor información sobre su uso contactar al suministrador.
Usos desaconsejados : Para consumidores.

1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Identificación de la Compañía : PRAXAIR ESPAÑA, S.L.U.
Orense, 11 - 5ª Planta
28020 Madrid
Dirección email (persona competente) : contact_espana@praxair.com

1.4. Teléfono de emergencia

Teléfono (persona competente) : (+34)914533000
Teléfono de emergencia en Transporte Líquido (24 h) : (+34)915974453
Teléfono de emergencia en Instalaciones (24 h) : (+34)902213000
Teléfono de emergencia en Gases Especiales (24 h) : (+34)917863432

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

2.1. Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA) :
AHHHHH

Clase y categoría de riesgo, Código de Normativa CE :
1272/2008 (CLP)

- **Peligros físicos** : Gases inflamables - Categoría 1 - Peligro - (CLP : Flam. Gas 1) - H220
Gases a presión - Gases licuados - Atención - (CLP : Press. Gas) - H280
- **Peligros para la salud** : Toxicidad aguda, por inhalación - Categoría 2 - Peligro - (CLP : Acute Tox. 2) - H330
Toxicidad específica en determinados órganos - Exposiciones únicas - Irritación de las vías respiratorias - Categoría 3 - Atención - (CLP : STOT SE 3) - H335
- **Peligros para el medio ambiente** : Peligroso para el medio ambiente acuático - Peligro agudo - Categoría 1 - Atención - (CLP : Aquatic Acute 1) - H400

Clasificación 67/548 CE o 1999/45 CE :

Clasificación CE : F+; R12 T+; R26 N; R50

2.2. Elementos de la etiqueta

Normativa de Etiquetado CE 1272/2008 (CLP) :

• **Pictogramas de peligro** :



GHS06



GHS02



GHS09



GHS04

• **Palabra de advertencia** : Peligro
• **Indicación de peligro** :

H220 : Gas extremadamente inflamable.
H280 : Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.
H330 : Mortal en caso de inhalación.
H335 : Puede irritar las vías respiratorias.
H400 : Muy tóxico para los organismos acuáticos.

• **Consejos de prudencia** :
- **Prevención** :

P260 : No respirar el polvo, el humo, el gas, la niebla, los vapores o el aerosol.
P210 : Mantener alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. – No fumar.
P273 : Evitar su liberación al medio ambiente.

- **Respuesta** :

P304+P340+P315 : EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar. Consulte a un médico inmediatamente.
P377 : Fuga de gas en llamas: No apagar, salvo si la fuga puede detenerse sin peligro.
P381 : Eliminar todas las fuentes de ignición si no hay peligro en hacerlo.

- **Almacenamiento** :

P403 : Almacenar en un lugar bien ventilado.
P405 : Guardar bajo llave.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**073****SULFURO DE HIDROGENO****2.3. Otros peligros****Información general**

: El contacto con el líquido puede causar quemaduras por frío o congelación.

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes**3.1. Sustancia / Mezcla**

: Sustancia.

Nombre del componente

: sulfuro de hidrógeno

Contenido

: 100 %

Nº CAS

: 7783-06-4

Nº EC

: 231-977-3

Nº Índice

: 016-001-00-4

Nº Reach

: Nota2

Clasificación

: F+; R12 T+; R26 N; R50

Acute Tox. 2 (H330) Flam. Gas 1 (H220) STOT SE 3 (H335) Press. Gas Liquefied (H280) Aquatic Acute 1 (H400)

Información general

: No contiene otros componentes o impurezas que puedan influir en la clasificación del producto.

Texto completo de Frases-R, véase capítulo 16.

Texto completo de declaraciones-H, véase capítulo 16.

SECCIÓN 4: Primeros auxilios**4.1. Descripción de los primeros auxilios****- Inhalación**

: Retirar a la víctima a un área no contaminada llevando colocado el equipo de respiración autónoma. Mantener a la víctima caliente y en reposo. Llamar al doctor. Aplicar la respiración artificial si se para la respiración.

- Contacto con la piel

: No se esperan efectos adversos de este producto.

- Contacto con los ojos

: No se esperan efectos adversos de este producto.

- Ingestión

: La ingestión no está considerada como una vía potencial de exposición.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados**Información general**

: Puede causar efectos perjudiciales al sistema nervioso central, al metabolismo y al tracto gastrointestinal.

La exposición prolongada a pequeñas concentraciones puede producir edema pulmonar.

Ver la Sección 11.

Irritación del tracto respiratorio.

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente**Información general**

: Obtener asistencia médica.

Ninguno.

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios**5.1. Medios de extinción****- Medios de extinción adecuados**

: Agua en spray o en nebulizador.

Polvo seco.

- Medios de extinción inadecuados

: No usar agua a presión para extinguirlo.

Dióxido de carbono.

5.2. Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla**Peligros específicos**

: La exposición al fuego puede causar la rotura o explosión de los recipientes.

Productos de combustión

: Si está involucrado en un fuego, los siguientes humos corrosivos y/o tóxicos pueden producirse por descomposición

peligrosos

térmica:

Dióxido de azufre.

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios**Métodos específicos**

: Si es posible detener la fuga de producto.

Utilizar medidas de control de incendios apropiadas con el incendio circundante. La exposición de los envases de gas al fuego y al calor puede provocar su ruptura. Enfriar los envases dañados con chorro de agua pulverizada desde una posición protegida. No vaciar el agua contaminada por el fuego en los desagües.

No extinguir una fuga de gas inflamada si no es absolutamente necesario. Se puede producir la reignición espontánea explosiva. Extinguir los otros fuegos.

Usar agua en spray o en nebulizador para disipar humos de incendios.

Equipo de protección especial para extinción de incendios

: Utilizar equipos de respiración autónoma en combinación con ropa ajustada de protección química.

Standard EN 137-máscara de cara completa que incluya un aparato de respiración autónoma de aire comprimido en circuito abierto.

EN 943-2: Vestimenta protectora de productos químicos líquidos y gaseosos, aerosoles y partículas sólidas. Trajes de protección de productos químicos para equipos de emergencia.

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental**6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia**

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**073****SULFURO DE HIDROGENO****Información general**

- : Téngase en cuenta el riesgo de atmósferas explosivas.
- Intentar parar el escape/derrame.
- Eliminar las fuentes de ignición.
- Evacuar el área.
- Vigilar la concentración de producto emitido.
- Asegurar la adecuada ventilación de aire.
- Utilizar equipos de respiración autónoma cuando entren en el área a menos que esté probado que la atmósfera es segura.
- Prevenir la entrada en alcantarillas, sótanos, fosos de trabajo o en cualquier otro lugar donde la acumulación pueda ser peligrosa.

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente**Información general**

- : Intentar parar el escape/derrame.

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza**Información general**

- : Ventilar la zona.
- Regar el área con agua.

6.4. Referencia a otras secciones**Información general**

- : Ver también las Secciones 8 y 13.

SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento**7.1. Precauciones para una manipulación segura****Uso seguro del producto**

- : Solo personas experimentadas y debidamente entrenadas deben manejar gases sometidos a presión.
- La sustancia debe ser manipulada de acuerdo con los procedimientos de buena higiene industrial y seguridad.
- Utilizar solo equipo específicamente apropiado para este producto y para su presión y temperatura de suministro, en caso de duda contacte con su suministrador.
- Evítese la exposición, recabese instrucciones especiales antes del uso.
- Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.
- Purgar el aire del sistema antes de introducir el gas.
- Mantener lejos de fuentes de ignición, incluyendo descarga estática.
- No fumar cuando se manipule el producto.
- Tener en cuenta el riesgo de una posible atmósfera susceptible de explotar y la necesidad de disponer de un equipo que pruebe la explosión.
- Considerar el uso de herramientas que no emitan chispas.
- Comprobar que el conjunto del sistema de gas ha sido, o es con regularidad, revisado antes de usarse respecto a la posibilidad de escapes.
- Se recomienda la instalación de un sistema de purgado entre la botella y el regulador.
- Evitar el retorno del agua, los ácidos y las bases.
- Considerar los instrumentos de reducción de la presión en las instalaciones de gas..
- : Solicitar del suministrador las instrucciones de manipulación de los contenedores.
- No permitir el retroceso hacia el interior del recipiente.
- Proteger las botellas de los daños materiales, no arrastrar, ni rodar, deslizar ó dejar caer.
- Si mueve botellas, incluso en pequeños recorridos, use una carretilla (mecánica, manual, etc) diseñada para transportar botellas.
- Mantener colocada la caperuza de la válvula hasta que el envase quede fijo contra una pared, un banco ó situado en una plataforma, y ya dispuesto para su uso.
- Si el usuario aprecia cualquier problema en una válvula de una botella en uso, termine su utilización y contacte al suministrador.
- Nunca intentar reparar ó modificar las válvulas de los depósitos ó los mecanismos de seguridad.
- Las válvulas que están dañadas deben ser inmediatamente comunicadas al suministrador.
- Mantener los accesorios de la válvula del depósito libre de contaminantes, especialmente aceites y agua.
- Reponer la caperuza de la válvula ó del depósito si se facilitan por el suministrador, siempre que el envase quede desconectado del equipo.
- Cierre la válvula del depósito después de su uso y cuando quede vacío, incluso si aún está conectado al equipo.
- No intentar nunca trasvasar gases de una botella/envase a otro.
- No utilizar nunca mecanismos con llamas ó de calentamiento eléctrico para elevar la presión del depósito.
- No quitar ni desfigurar las etiquetas facilitadas por el suministrador para identificar el contenido de las botellas.

Manipulación segura del envase del gas**7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades****Información general**

- : Observar todas las regulaciones y los requerimientos locales relativos al almacenamiento de contenedores.
- Mantener el contenedor por debajo de 50°C, en un lugar bien ventilado.
- Los contenedores ser almacenados en posición vertical y debidamente asegurados para evitar su caída.
- Separar de los gases oxidantes o de otros materiales oxidantes durante el almacenamiento.
- Los contenedores almacenados deben ser comprobados periódicamente respecto a su estado general y a posibles fugas.
- Las protecciones de las válvulas y las caperuzas deben estar colocadas.
- Almacenar los contenedores en un lugar libre del riesgo y lejos de fuentes de calor e ignición.
- Todos los equipos eléctricos en las áreas de almacenamiento deben ser compatibles con el riesgo de una posible atmósfera explosiva.
- Los contenedores no deben ser almacenados en condiciones que favorezcan la corrosión.
- Mantener alejado de materiales combustibles.

7.3. Usos específicos finales**Información general**

- : Ninguno.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**073****SULFURO DE HIDROGENO****SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual****8.1. Parámetros de control**

Límites de exposición profesional

- sulfuro de hidrógeno : ILV (EU) - 8 H - [mg/m³] : 7
- sulfuro de hidrógeno : ILV (EU) - 8 H - [ppm] : 5
- sulfuro de hidrógeno : ILV (EU) - 15 min - [mg/m³] : 14
- sulfuro de hidrógeno : ILV (EU) - 15 min - [ppm] : 10
- sulfuro de hidrógeno : VLA-ED España [ppm] : 5
- sulfuro de hidrógeno : VLA-ED España [mg/m³] : 7
- sulfuro de hidrógeno : VLA-EC España [ppm] : 10
- sulfuro de hidrógeno : VLA-EC España [mg/m³] : 14

8.2. Controles de la exposición**Controles técnicos apropiados**

- Producto que debe ser manipulado en el contexto de un sistema cerrado y bajo estrictas condiciones de control. Mantener la concentración por debajo de los límites de concentración admitido para profesionales. Considerar un sistema de permisos de trabajo p.ej para trabajos de mantenimiento. Usar preferiblemente solo en instalaciones selladas contra fugas permanentemente (Por ej. tuberías soldadas). Los sistemas sujetos a presión deben ser regularmente comprobados respecto a fugas. Proporcionar ventilación adecuada, general y local, a los gases de escape. Deben ser usados detectores de alarma cuando puedan desprenderse gases tóxicos.

Equipo de protección personal

- PPE que cumplan los estándares recomendados por EN/ISO deben seleccionarse. Un análisis de riesgos debe ser realizado y formalizado en cada área de trabajo para evaluar los riesgos relacionados con el uso del producto y para determinar el PPE que provoca un riesgo relevante. Estas recomendaciones deben ser tenidas en cuenta.

• Protección para el ojo/cara

- usar gafas con de seguridad con protecciones laterales. usar gafas de seguridad con protecciones laterales o gafas cerradas sobre los ojos al hacer trasvases o al efectuar desconexiones. Standard EN 166- Protección para el ojo.

• Protección para la piel**- Protección de las manos**

- Usar guantes de trabajo al manejar envases de gases. Standard EN 388- guantes que protegen contra riesgos mecánicos. Usar guantes protectores que resistan a los productos químicos. Standard EN 388- guantes que protegen contra productos químicos. Tiempo de filtración: mínimo > 480 min exposición de larga duración; material/espesor [mm]: Goma de Nitrilo (NBR) / 0,7. El tiempo de ruptura previsto para el guante seleccionado debe de ser mayor que el tiempo de uso pretendido. Consultar la información del fabricante del guante sobre el producto en relación con la idoneidad del material y su espesor.

- Otras

- Usar zapatos de seguridad mientras se manejan envases. Standard EN ISO 20345 - Equipos de protección personal-zapatos de seguridad. Considerar el uso de prendas de seguridad resistentes a llama antiestática. Estándar EN ISO 14116- Materiales que limitan la difusión de llamas. Standard EN ISO 1149-5- Ropa de protección: Propiedades electrostáticas.
- Los filtros de gas pueden usarse si todas las condiciones existentes, tales como tipo, concentración del/los contaminante/s y tiempo de uso son todas conocidas. Disponer de aparato de respiración autónomo para uso en caso de emergencia. Usar filtros de gas y mascarar que cubran toda la cara, en caso de superar los límites de exposición por un periodo corto de tiempo, por ej. Al conectar o desconectar contenedores. Filtro recomendado B (gris). Para la selección del equipo adecuado consultar la información de producto elaborada por el fabricante del equipo de respiración. Standard EN 14387-filtros de gas(es), filtro(s) combinado(s) y mascarar que cubran toda la cara-EN 136. Los filtros de gas no protegen contra la insuficiencia de oxígeno. Standard EN 137-mascara de cara completa que incluya un aparato de respiración autónomo de aire comprimido en circuito abierto. Se recomienda un sistema de respiración autónoma, en caso de que pueda producirse una exposición a algo no conocido, por ej. Al efectuar operaciones de mantenimiento de instalaciones.

• Peligros térmicos**Controles de exposición medioambiental**

- No necesaria.
- Tener en cuenta las regulaciones locales relativas a las restricciones de emisiones a la atmósfera. Ver sección 13 para métodos específicos de tratamiento de residuos de gases.

SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas**9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas****Apariencia****Estado físico a 20°C / 101.3kPa****Color****Olor**

- Gas.
- Gas.
- Incoloro.
- Huevos podridos. El olor puede persistir. Sin olor a pequeñas concentraciones.

Umbral olfativo**Valor de pH****Masa molecular [g/mol]****Punto de fusión [°C]****Punto de ebullición [°C]**

- La superación de límites por el olor es subjetiva e inadecuado para advertir del riesgo de sobrecarga.
- No aplica.
- 34
- 86
- 60.2

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**073****SULFURO DE HIDROGENO**

Temperatura crítica [°C]	: 100
Punto de inflamación [°C]	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.
Velocidad de evaporación (éter=1)	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.
Rango de inflamabilidad [% de volumen en aire]	: 3.9 - 45.5
Presión de vapor [20°C]	: 18.8 bar
Densidad relativa del gas (aire=1)	: 1.2
Densidad relativa del líquido (agua=1)	: 0.92
Solubilidad en agua [mg/l]	: 3980
Coefficiente de reparto n-octanol/agua [log Kow]	: No es aplicable a gases inorgánicos.
Temperatura de auto-inflamación [°C]	: 270
Viscosidad a 20°C [mPa.s]	: No aplica.
Propiedades explosivas	: No aplica.
Propiedades comburentes	: Ninguno.
9.2 Información adicional	
Otros datos	: El vapor es mas pesado que el aire. Puede acumularse en espacios confinados, particularmente al nivel del suelo o en sótanos.

SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

10.1. Reactividad	
Información general	: Sin riesgo de reactividad salvo lo expresado en la sub-sección mas adelante.
10.2. Estabilidad química	
Información general	: Estable en condiciones normales.
10.3. Posibilidad de reacciones peligrosas	
Información general	: Puede reaccionar violentamente con materias oxidantes. Puede formar mezclas explosivas con el aire.
10.4. Condiciones que deben evitarse	
Información general	: Manténgase alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. – No fumar. Evitar humedades en las instalaciones.
10.5. Materiales incompatibles	
Información general	: En contacto con el agua produce una rápida corrosión en algunos metales. Humedad. Aire, Oxidante. Para información complementaria sobre su compatibilidad referirse a la ISO 11114.
10.6. Productos de descomposición peligrosos	
Información general	: Productos con riesgo de descomposición no se deben producir por en condiciones normales de almacenamiento y uso.

SECCIÓN 11: Información toxicológica

11.1. Información sobre los efectos toxicológicos	
Toxicidad aguda	:
LC50 por inhalación en rata [ppm/4h]	: 356
Corrosión o irritación cutáneas	: Se desconocen los efectos de este producto.
Lesiones o irritación ocular graves	: Se desconocen los efectos de este producto.
Sensibilización respiratoria o cutánea	: Se desconocen los efectos de este producto.
Carcinogénesis	: Se desconocen los efectos de este producto.
Mutagenicidad	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad para la reproducción	: Se desconocen los efectos de este producto.
Tóxico para la reproducción fertilidad	: Se desconocen los efectos de este producto.
Tóxico para la reproducción feto	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición única	: Irritación del tracto respiratorio.
Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición repetida	: Daños al sistema nervioso central.
Peligro de aspiración	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.

SECCIÓN 12: Información ecológica

12.1. Toxicidad	
Información general	: H400 : Muy tóxico para los organismos acuáticos.
EC50 48 Horas - Daphnia magna [mg/l]	: 0.12
EC50 72h Algae [mg/l]	: 1.87
LC50-96 Horas en pez [mg/l]	: 0.007 - 0.019
12.2. Persistencia y degradabilidad	

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

073

SULFURO DE HIDROGENO

Información general	: No es aplicable a gases inorgánicos.
12.3. Potencial de bioacumulación	
Información general	: Sin datos disponibles.
12.4. Movilidad en el suelo	
Información general	: Debido a su alta volatilidad el producto es difícil que cause contaminación al suelo o al agua.
12.5. Resultados de la valoración PBT y mPmB	
Información general	: No se clasifica como PBT o vPvB.
12.6. Otros efectos adversos	
Información general	: Puede causar cambios en el pH de los sistemas acuáticos ecológicos.
Efectos sobre la capa de ozono	: Ninguno.
Produce efectos en el calentamiento global	: Se desconocen los efectos de este producto.

SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación




13.1. Métodos para el tratamiento de residuos

Información general	: Necesidad no ser descargado a la atmósfera. El gas puede ser eliminado en una solución alcalina, en condiciones controladas para evitar una reacción violenta. Los gases tóxicos y corrosivos formados durante la combustión deben ser lavados antes de ser descargados en la atmósfera. Referirse al código de prácticas de EIGA Doc 30/10 Eliminación de gases accesible en http://www.eiga.org para mayor información sobre métodos adecuados de vertidos. Contactar con el suministrador si se necesita orientación. Asegurarse de no superar los límites de emisión establecidos en regulaciones locales.
Lista de residuos peligrosos	: 16 05 04: Contenedores de gases a presión (incluido halones) que contienen sustancias peligrosas.

13.2. Información complementaria

Información general	: Ninguno.
----------------------------	------------

SECCIÓN 14: Información relativa al transporte

14.1. Número ONU	
Número ONU	: 1053
14.2. Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	
Designación oficial	: SULFURO DE HIDRÓGENO
14.3. Clase(s) de peligro para el transporte	
Clase(s) de peligro para el transporte	:   
	2.3 : Gases tóxicos (2.1 : Gases inflamables) (9E : Sustancias peligrosas para el medio ambiente)

14.4. Grupo de embalaje

Código de clasificación	: 2 TF
--------------------------------	-----------

14.5. Peligros de contaminación

Peligros para el medio ambiente	: Sustancia/mezcla peligrosa para el medioambiente.
--	---

IMDG-Marine pollutant

14.6 Precauciones particulares para los usuarios

Información general	: Evitar el transporte en los vehículos donde el espacio de la carga no esté separado del compartimiento del conductor. Asegurar que el conductor está enterado de los riesgos potenciales de la carga y que conoce que hacer en caso de un accidente o de una emergencia. Antes de transportar las botellas : - Asegurar una ventilación adecuada. - Asegúrese de que los recipientes están bien fijados. - Asegurarse que las válvulas de las botellas están cerradas y no fugan. - Asegurarse que el tapón del acoplamiento de la válvula (cuando exista) está adecuadamente apretado. - Asegurarse que la caperuza de la válvula o la tulipa, (cuando exista), está adecuadamente apretada.
----------------------------	--

14.7. Transporte de granel según anexo II del tratado MARPOL 73/78 y según código IBC

Información general	: No aplica.
----------------------------	--------------

SECCIÓN 15: Información reglamentaria

15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

Legislación UE	:
Restricciones	: Ninguno.
Seveso directiva 96/82/EC	: Figura en la lista.
Legislación Nacional	:

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD**073****SULFURO DE HIDROGENO****Información general**

: Asegúrese que se cumplen las normativas nacionales y locales.

15.2.Evaluación de la seguridad química**Información general**

: Este producto bien esta exento de REACH por no superar los limites minimos de volumen que exigen un CSR ,ó bien no se ha desarrollado un CSA .

SECCIÓN 16: Otra información**Enumeración de los cambios**

: Hoja de datos de seguridad revisada de acuerdo con la regulación de la Comisión (UE) Nº453/2010.

Consejos relativos a la formación: Asegurarse que los operarios conocen el riesgo de inflamabilidad.
Los usuarios de los aparatos de respiración deben ser entrenados.
Asegurarse que los operarios comprenden los riesgos de toxicidad.**Etiquetado 67/548 CE o 1999/45 CE****• Símbolo(s)**

F+ : Extremadamente inflamable

T+ : Muy tóxico.

N : Peligroso para el medio ambiente.

• Frase(s) R

: R12 : Extremadamente inflamable.

R26 : Muy tóxico por inhalación.

R50 : Muy tóxico para los organismos acuáticos.

• Frase(s) S

: S9 : Consérvese el recipiente en lugar bien ventilado.

S16 : Conservar alejado de toda llama o fuente de chispas - No fumar.

S28 : En caso de contacto con la piel, lávese inmediata y abundantemente con

S36/37 : Usense indumentaria y guantes de protección adecuados.

S45 : En caso de accidente o malestar, acúdase inmediatamente al médico (si es posible, muéstrese la etiqueta).

S61 : Evítese su liberación al medio ambiente. Recábense instrucciones específicas de la ficha de datos de seguridad.

: R12 : Extremadamente inflamable. R26 : Muy tóxico por inhalación. R50 : Muy tóxico para los organismos acuáticos.

Lista del texto completo de**Frases-R en la sección 3****Origen de la información****Notas**

: La presente Ficha de Datos de Seguridad está establecida de acuerdo con las Directivas Europeas en vigor .

: Nota 1:

Figura en la lista del Anexo IV / V de REACH, exento de solicitud de registro.

Nota 2:

No ha expirado el plazo límite de solicitud de registro.

Nota 3:

No exige su registro.Sustancias fabricadas o importadas<1t/y.

Otras advertencias

: Antes de utilizar el producto en un nuevo proceso o experimento, debe llevarse a cabo un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales.

Los detalles dados son ciertos y correctos en el momento de llevarse este documento a impresión.

A pesar de que durante la preparación de este documento se ha tomado especial cuidado, no se acepta ninguna responsabilidad por las lesiones o los daños resultantes.

Responsabilidades

: Estas instrucciones han sido elaboradas por Praxair sobre la base de las informaciones disponibles a la fecha de las mismas y cubren las aplicaciones más habituales, sin garantizar que su contenido sea suficiente en todos los casos y situaciones. Su observancia no excluye el cumplimiento de la normativa vigente en cada momento.

Descripción de cambios

: Adaptación a la normativa vigente.

Fin del documento

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD



Agilent Technologies

Qualitative Natural Gas Standard, Part Number 5080-8756

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Nombre del producto : Qualitative Natural Gas Standard, Part Number 5080-8756

Número Del Producto : 5080-8756

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados
Reactivo analítico. 2 Liters @ 60 psig

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Agilent Technologies Manufacturing GmbH & Co. KG
Hewlett-Packard-Str. 8
76337 Waldbronn
Alemania
0800 603 1000

Dirección de e-mail de la persona responsable de esta FDS : pdl-msds_author@agilent.com

1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de urgencias (con horas de funcionamiento) : CHEMTREC®: 900-868538

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Definición del producto : Mezcla

Clasificación de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 1272/2008 [CLP/GHS]

H220 GASES INFLAMABLES - Categoría 1
H280 GASES A PRESIÓN - Gas comprimido

Componentes de toxicidad desconocida : Porcentaje de la mezcla consistente de ingrediente(s) de toxicidad desconocida: 1%

Componentes de ecotoxicidad desconocida : Porcentaje de la mezcla consistente de ingrediente(s) con peligros desconocidos para el medio ambiente acuático: 1%

Consultar en la Sección 16 el texto completo de las frases H arriba declaradas.

En caso de requerir información más detallada relativa a los síntomas y efectos sobre la salud, consulte en la Sección 11.

2.2 Elementos de la etiqueta

Pictogramas de peligro :



Palabra de advertencia : Peligro

Fecha de emisión/Fecha de revisión : 23/02/2016

1/14

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

Indicaciones de peligro : H220 - Gas extremadamente inflamable.
H280 - Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.

Consejos de prudencia

Prevención : P210 - Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.

Respuesta : P377 - Fuga de gas en llamas: No apagar, salvo si la fuga puede detenerse sin peligro.
P381 - Eliminar todas las fuentes de ignición si no hay peligro en hacerlo.

Almacenamiento : P410 - Proteger de la luz del sol.

Eliminación : No aplicable.

Ingredientes peligrosos : No hay un componente peligroso

Elementos suplementarios que deben figurar en las etiquetas : No aplicable.

Anexo XVII - Restricciones a la fabricación, la comercialización y el uso de determinadas sustancias, mezclas y artículos peligrosos : No aplicable.

Requisitos especiales de envasado

Advertencia de peligro táctil : No aplicable.

2.3 Otros peligros

Otros peligros que no conducen a una clasificación : Se comporta con un asfixiante simple. En concentraciones muy altas, pueden desplazar el aire normal y provocar asfixia a causa de la falta de oxígeno.

SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes**3.2 Mezclas** : Mezcla

Nombre del producto o ingrediente	Identificadores	%	Clasificación	Tipo
Metano	CE: 200-812-7 CAS: 74-82-8 Índice: 601-001-00-4	≥50 - ≤75	Flam. Gas 1, H220 Press. Gas Comp. Gas, H280	[2]
Etano	CE: 200-814-8 CAS: 74-84-0 Índice: 601-002-00-X	≤10	Flam. Gas 1, H220 Press. Gas Comp. Gas, H280	[2]
Propano	CE: 200-827-9 CAS: 74-98-6 Índice: 601-003-00-5	≤10	Flam. Gas 1, H220 Press. Gas Comp. Gas, H280	[2]
Butano	CE: 203-448-7 CAS: 106-97-8 Índice: 601-004-00-0	≤5	Flam. Gas 1, H220 Press. Gas Comp. Gas, H280	[2]
Isobutano	CE: 200-857-2 CAS: 75-28-5 Índice: 601-004-00-0	≤5	Flam. Gas 1, H220 Press. Gas Comp. Gas, H280	[2]
pentano	CE: 203-692-4 CAS: 109-66-0 Índice: 601-006-00-1	≤1	Flam. Liq. 2, H225 STOT SE 3, H336 Asp. Tox. 1, H304 Aquatic Chronic 2, H411 EUH066	[1] [2]
Isopentano	CE: 201-142-8 CAS: 78-78-4 Índice: 601-085-00-2	≤1	Flam. Liq. 1, H224 STOT SE 3, H336 Asp. Tox. 1, H304	[1] [2]

SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes

Dióxido de carbono	CE: 204-696-9 CAS: 124-38-9	≤3	Aquatic Chronic 2, H411 EUH066 Press. Gas Comp. Gas, H280	[2]
n-Hexano	CE: 203-777-6 CAS: 110-54-3 Índice: 601-037-00-0	<1	Flam. Liq. 2, H225 Skin Irrit. 2, H315 Repr. 2, H361f (Fertilidad) STOT SE 3, H336 STOT RE 2, H373 Asp. Tox. 1, H304 Aquatic Chronic 2, H411 Consultar en la Sección 16 el texto completo de las frases H arriba declaradas.	[1] [2]

Tipo

[1] Sustancia clasificada con un riesgo a la salud o al medio ambiente

[2] Sustancia con límites de exposición profesionales

[3] La sustancia cumple los criterios de PBT según el Reglamento (CE) nº. 1907/2006, Anexo XIII

[4] La sustancia cumple los criterios de mPmB según el Reglamento (CE) nº. 1907/2006, Anexo XIII

[5] Sustancia que suscite un grado de preocupación equivalente


SECCIÓN 4. Primeros auxilios**4.1 Descripción de los primeros auxilios**

- Contacto con los ojos** : Enjuagar los ojos inmediatamente con mucha agua, levantando de vez en cuando los párpados superior e inferior. Verificar si la víctima lleva lentes de contacto y en este caso, retirárselas. Continúe enjuagando por lo menos durante 10 minutos. Buscar atención médica si se produce una irritación.
- Inhalación** : Transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar. Si se sospecha que los vapores continúan presentes, la persona encargada del rescate deberá usar una máscara adecuada o un aparato de respiración autónoma. Si no hay respiración, ésta es irregular u ocurre un paro respiratorio, el personal capacitado debe proporcionar respiración artificial u oxígeno. Puede ser peligroso para la persona que proporcione ayuda al dar respiración boca a boca. Consiga atención médica si persisten los efectos de salud adversos o son severos. Si está inconsciente, coloque en posición de recuperación y consiga atención médica inmediatamente. Asegure una buena circulación de aire. Aflojar todo lo que pudiera estar apretado, como el cuello de una camisa, una corbata, un cinturón. En caso de inhalación de productos en descomposición en un incendio, los síntomas pueden aparecer posteriormente. Es posible que la persona expuesta tenga que estar bajo vigilancia médica por un período de 48 horas.
- Contacto con la piel** : Lavar la piel contaminada con agua y jabón. Quítense la ropa y calzado contaminados. Aclarar la ropa contaminada con agua cuidadosamente antes de quitársela, para evitar el riesgo de descargas estáticas y de ignición del gas. Busque atención médica si se presentan síntomas. Lavar la ropa antes de volver a usarla. Limpiar completamente el calzado antes de volver a usarlo.
- Ingestión** : Como este producto es un gas, refiérase a la sección de inhalación.
- Protección del personal de primeros auxilios** : No se debe realizar ninguna acción que suponga un riesgo personal o sin formación adecuada. Si se sospecha que los vapores continúan presentes, la persona encargada del rescate deberá usar una máscara adecuada o un aparato de respiración autónoma. Puede ser peligroso para la persona que proporcione ayuda al dar respiración boca a boca.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardadosEfectos agudos potenciales para la salud

- Contacto con los ojos** : Contacto con gas que se expande rápidamente puede causar quemaduras o congelación.
- Inhalación** : En concentraciones muy altas, pueden desplazar el aire normal y provocar asfixia a causa de la falta de oxígeno.

SECCIÓN 4. Primeros auxilios

Contacto con la piel :  Contacto con gas que se expande rápidamente puede causar quemaduras o congelación.

Ingestión : Como este producto es un gas, refiérase a la sección de inhalación.

Signos/síntomas de sobreexposición

Contacto con los ojos : Ningún dato específico.

Inhalación : Ningún dato específico.

Contacto con la piel :  Ningún dato específico.

Ingestión : Ningún dato específico.

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Notas para el médico : En caso de inhalación de productos en descomposición en un incendio, los síntomas pueden aparecer posteriormente. Es posible que la persona expuesta tenga que estar bajo vigilancia médica por un período de 48 horas.

Tratamientos específicos : No hay un tratamiento específico.

SECCIÓN 5. Medidas de lucha contra incendios**5.1 Medios de extinción**

Medios de extinción apropiados : Usar un agente de extinción adecuado para el incendio circundante.

Medios de extinción no apropiados : No se conoce ninguno.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Peligros derivados de la sustancia o mezcla : Contiene gas a presión. Gas extremadamente inflamable. La presión puede aumentar y el contenedor puede explotar en caso de calentamiento o incendio, con el riesgo de producirse una explosión.

Productos peligrosos de la combustión : Los productos de descomposición pueden incluir los siguientes materiales:
dióxido de carbono
monóxido de carbono
óxido de nitrógeno

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

Precauciones especiales para los bomberos : En caso de incendio, aislar rápidamente la zona, evacuando a todas las personas de las proximidades del lugar del incidente. No se debe realizar ninguna acción que suponga un riesgo personal o sin formación adecuada. Contactar con el proveedor inmediatamente para asistencia especializada. Desplazar los contenedores lejos del incendio si puede hacerse sin peligro. Use agua pulverizada para refrigerar los envases expuestos al fuego. Si se encuentra en un incendio, corte el flujo inmediatamente si se puede hacer sin riesgo. Si esto es imposible, retirese del área y deje que arda el producto. Combata el incendio desde un lugar protegido o a la máxima distancia posible. Eliminar todas las fuentes de ignición si no hay peligro en hacerlo.

Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios : Los bomberos deben llevar equipo de protección apropiado y un equipo de respiración autónomo con una máscara facial completa que opere en modo de presión positiva. Las prendas para bomberos (incluidos cascos, guantes y botas de protección) conformes a la norma europea EN 469 proporcionan un nivel básico de protección en caso de incidente químico.

Información adicional : El contenedor puede explotar si hay un incendio o cuando se calienta.

SECCIÓN 6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

- Para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia** : Descargas accidentales presentan un serio riesgo de fuego o explosión. No se debe realizar ninguna acción que suponga un riesgo personal o sin formación adecuada. Evacuar los alrededores. No deje que entre el personal innecesario y sin protección. Apagar todas las fuentes de ignición. Ni bengalas, ni humo, ni llamas en en el área de riesgo. Evitar respirar gas. Proporcione ventilación adecuada. Llevar un aparato de respiración apropiado cuando el sistema de ventilación sea inadecuado. Llevar puesto un equipo de protección individual adecuado.
- Para el personal de emergencia** : Si se necesitan prendas especiales para gestionar el vertido, tomar en cuenta las informaciones recogidas en la Sección 8 en relación a los materiales adecuados y no adecuados. Consultar también la información mencionada en "Para personal de no emergencia".

- 6.2 Precauciones relativas al medio ambiente** : Asegúrese de que existen procedimientos de emergencia para afrontar fugas de gas accidentales que eviten la contaminación medioambiental. Informar a las autoridades pertinentes si el producto ha causado contaminación medioambiental (alcantarillas, vías fluviales, suelo o aire).

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza

- Métodos para limpieza** : Contacte inmediatamente con el personal de emergencia. Detener la fuga si esto no presenta ningún riesgo. Use herramientas a prueba de chispas y equipo a prueba de explosión.

- 6.4 Referencia a otras secciones** : Consultar en la Sección 1 la información de contacto en caso de emergencia. Consultar en la Sección 8 la información relativa a equipos de protección personal apropiados. Consulte en la Sección 13 la información adicional relativa al tratamiento de residuos.

SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Precauciones para una manipulación segura

- Medidas de protección** : Usar un equipo de protección personal adecuado (Consultar Sección 8). Contiene gas a presión. Evite el contacto con los ojos, la piel y la ropa. Evitar respirar gas. Use sólo con ventilación adecuada. Llevar un aparato de respiración apropiado cuando el sistema de ventilación sea inadecuado. No entre en áreas de almacenamiento y espacios cerrados a menos que estén ventilados adecuadamente. Mantener alejado del calor, chispas, llamas al descubierto, o de cualquier otra fuente de ignición. Use equipo eléctrico (de ventilación, iluminación y manipulación de materiales) a prueba de explosiones. Utilizar únicamente herramientas que no produzcan chispas. Los envases vacíos retienen residuos del producto y pueden ser peligrosos. No perforar o incinerar el contenedor.
- Información relativa a higiene en el trabajo de forma general** : Deberá prohibirse comer, beber o fumar en los lugares donde se manipula, almacena o trata este producto. Los trabajadores deberán lavarse las manos y la cara antes de comer, beber o fumar. Retirar el equipo de protección y las ropas contaminadas antes de acceder a zonas donde se coma. Consultar también en la Sección 8 la información adicional sobre medidas higiénicas.

- 7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades** : Conservar de acuerdo con las normativas locales. Almacenar en un área separada y homologada. Almacenar alejado de la luz directa del sol en un área seca, fresca y bien ventilada, separado de materiales incompatibles (ver Sección 10). Eliminar todas las fuentes de ignición. Mantener el contenedor bien cerrado y sellado hasta el momento de usarlo.

Directiva Seveso - Umbrales de notificación (en toneladas)
Sustancias indentificadas

SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento

Nombre	Notificación y umbral MAPP	Umbral de notificación de seguridad
Liquefied flammable gases, Category 1 or 2 (including LPG) and natural gas	50	200
Oxygen	200	2000
Liquefied flammable gases, Category 1 or 2 (including LPG) and natural gas	50	200
Liquefied flammable gases, Category 1 or 2 (including LPG) and natural gas	50	200
Liquefied flammable gases, Category 1 or 2 (including LPG) and natural gas	50	200

Crterios de peligro

Categoría	Notificación y umbral MAPP	Umbral de notificación de seguridad
P2: Gases inflamables	10	50

7.3 Usos específicos finales

Recomendaciones : Aplicaciones industriales, Aplicaciones profesionales.

Soluciones específicas del sector industrial : No aplicable.

SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual**8.1 Parámetros de control****Límites de exposición profesional**

Nombre del producto o ingrediente	Valores límite de la exposición
Metano	INSHT (España, 1/2015). VLA-ED: 1000 ppm 8 horas. Forma: gases
Etano	INSHT (España, 1/2015). VLA-ED: 1000 ppm 8 horas. Forma: gases
Propano	INSHT (España, 1/2015). VLA-ED: 1000 ppm 8 horas. Forma: gases
Butano	INSHT (España, 1/2015). VLA-ED: 1000 ppm 8 horas. Forma: gases
Isobutano	INSHT (España, 1/2015). VLA-ED: 1000 ppm 8 horas. Forma: gases
pentano	INSHT (España, 1/2015). VLA-ED: 1000 ppm 8 horas. Forma: gases
Isopentano	INSHT (España, 1/2015). VLA-ED: 1000 ppm 8 horas. VLA-ED: 3000 mg/m³ 8 horas.
Dióxido de carbono	INSHT (España, 1/2015). VLA-ED: 9150 mg/m³ 8 horas. VLA-ED: 5000 ppm 8 horas.
n-Hexano	INSHT (España, 1/2015). VLA-ED: 20 ppm 8 horas. VLA-ED: 72 mg/m³ 8 horas.

Procedimientos recomendados de control : Si este producto contiene ingredientes con límites de exposición, puede ser necesaria la supervisión personal, del ambiente de trabajo o biológica para determinar la efectividad de la ventilación o de otras medidas de control y/o la necesidad de usar un equipo de protección respiratoria. Deben utilizarse como referencia normas de monitorización como las siguientes: Norma europea EN 689 (Atmósferas en los lugares de trabajo. Directrices para la evaluación de la exposición por inhalación de agentes químicos para la comparación con los valores límite y estrategia de medición) Norma europea EN 14042 (Atmósferas en los lugares de trabajo. Directrices para la aplicación y uso de procedimientos para evaluar la exposición a agentes químicos y

SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual

biológicos) Norma europea EN 482 (Atmósferas en los lugares de trabajo. Requisitos generales relativos al funcionamiento de los procedimientos para la medida de agentes químicos) Deberán utilizarse asimismo como referencia los documentos de orientación nacionales relativos a métodos de determinación de sustancias peligrosas.

Valores DNEL/DMEL

No hay valores DNEL/DMEL disponibles.

Valor PNEC

No hay valores PNEC disponibles.

8.2 Controles de la exposición**Controles técnicos apropiados**

- : Use sólo con ventilación adecuada. Utilizar aislamientos de áreas de producción, sistemas de ventilación locales, u otros procedimientos de ingeniería para mantener la exposición del obrero a los contaminantes aerotransportados por debajo de todos los límites recomendados o estatutarios. Los controles de ingeniería también deben mantener el gas, vapor o polvo por debajo del menor límite de explosión. Utilizar equipo de ventilación anti-explosión.

Medidas de protección individual**Medidas higiénicas**

- : Lave las manos, antebrazos y cara completamente después de manejar productos químicos, antes de comer, fumar y usar el lavabo y al final del período de trabajo. Usar las técnicas apropiadas para eliminar ropa contaminada. Lavar las ropas contaminadas antes de volver a usarlas. Verifique que las estaciones de lavado de ojos y duchas de seguridad se encuentren cerca de las estaciones de trabajo.

Protección de los ojos/la cara

- : Se debe usar un equipo protector ocular que cumpla con las normas aprobadas cuando una evaluación del riesgo indique que es necesario, a fin de evitar toda exposición a salpicaduras del líquido, lloviznas, gases o polvos. Si es posible el contacto, se debe utilizar la siguiente protección, salvo que la valoración indique un grado de protección más alto: gafas de seguridad con protección lateral.

Protección de la piel**Protección de las manos**

- : Si una evaluación del riesgo indica que es necesario, se deben usar guantes químico-resistentes e impenetrables que cumplan con las normas aprobadas siempre que se manejen productos químicos. Tomando en consideración los parámetros especificados por el fabricante de los guantes, comprobar durante el uso que los guantes siguen conservando sus propiedades protectoras. Hay que observar que el tiempo de paso de cualquier material utilizado con guantes puede ser diferente para distintos fabricantes de guantes. En el caso de mezclas, consistentes en varias sustancias, no es posible estimar de manera exacta, el tiempo de protección que ofrecen los guantes.

Protección corporal

- : Antes de utilizar este producto se debe seleccionar equipo protector personal para el cuerpo basándose en la tarea a ejecutar y los riesgos involucrados y debe ser aprobado por un especialista. Cuando haya riesgo de ignición a consecuencia de cargas electrostáticas, utilizar indumentaria de protección antiestática. Para ofrecer la máxima protección frente a descargas electrostáticas, la indumentaria debe incluir monos, botas y guantes con propiedades antiestáticas. Consultar la norma europea EN 1149 para obtener información adicional sobre requisitos de materiales y diseños y métodos de prueba.

Otro tipo de protección cutánea

- : Se deben elegir el calzado adecuado y cualquier otra medida de protección cutánea necesaria dependiendo de la tarea que se lleve a cabo y de los riesgos implicados. Tales medidas deben ser aprobadas por un especialista antes de proceder a la manipulación de este producto.


Protección respiratoria

- : ☒ El gas puede causar asfixia sin advertencia al reemplazar el oxígeno del aire. Basándose en la evaluación de los riesgos y la exposición, seleccionar un respirador que satisfaga los estándares o certificaciones apropiados. Si las condiciones de operación provocan la formación de elevadas concentraciones de gas o si se excede cualquier límite de exposición recomendado o legal, empléese un respirador con línea de aire o un aparato de respiración autónomo. Los respiradores deben usarse de conformidad con un programa de protección respiratoria para asegurar su adecuación, formación y otros aspectos del buen uso. Se debe seleccionar el respirador en base a los niveles de exposición reales o previstos, a la peligrosidad del producto y al grado de seguridad de funcionamiento del respirador elegido.

SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual

Controles de exposición medioambiental : Se deben verificar las emisiones de los equipos de ventilación o de los procesos de trabajo para verificar que cumplen con los requisitos de la legislación de protección del medio ambiente. En algunos casos para reducir las emisiones hasta un nivel aceptable, será necesario usar depuradores de humo, filtros o modificar el diseño del equipo del proceso.

SECCIÓN 9. Propiedades físicas y químicas**9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas**Aspecto

Estado físico	: Gas.
Color	: Incoloro.
Olor	: Inodoro.
Umbral olfativo	: No disponible.
pH	: No disponible.
Punto de fusión/punto de congelación	: No disponible.
Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición	: -161°C
Punto de inflamación	: Vaso cerrado: -183°C
Tasa de evaporación	: No disponible.
Inflamabilidad (sólido, gas)	: Altamente inflamable en la presencia de los siguientes materiales o condiciones: materiales oxidantes. El contenedor puede explotar si hay un incendio o cuando se calienta.
Límites superior/inferior de inflamabilidad o de explosividad	: Punto mínimo: 5% Punto máximo: 14%
Presión de vapor	: No disponible.
Densidad de vapor	: 0.555 [Aire= 1]
Densidad relativa	: 0.7168
Densidad	: 0.7168 g/cm³
Solubilidad(es)	: No disponible.
Coeficiente de reparto: n-octanol/agua	: No disponible.
Temperatura de auto-inflamación	: 650°C
Temperatura de descomposición	: No disponible.
Viscosidad	: No disponible.
Propiedades explosivas	:  No disponible.
Propiedades comburentes	: No disponible.

9.2 Otros datos

Ninguna información adicional.

SECCIÓN 10. Estabilidad y reactividad

- 10.1 Reactividad** : No hay datos de ensayo disponibles sobre la reactividad de este producto o sus componentes.
- 10.2 Estabilidad química** : El producto es estable.
- 10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas** : En condiciones normales de almacenamiento y uso, no se producen reacciones peligrosas.

SECCIÓN 10. Estabilidad y reactividad

10.4 Condiciones que deben evitarse : Evitar todas las fuentes posibles de ignición (chispa o llama). No someta a presión, corte, suelde, suelde con latón, taladre, esmerile o exponga los envases al calor o fuentes térmicas. No permita que el gas se acumule en áreas bajas o confinadas.

10.5 Materiales incompatibles : Puede reaccionar o ser incompatible con materiales oxidantes.

10.6 Productos de descomposición peligrosos : En condiciones normales de almacenamiento y uso, no se deberían formar productos de descomposición peligrosos.

SECCIÓN 11. Información toxicológica**11.1 Información sobre los efectos toxicológicos****Toxicidad aguda**

Nombre del producto o ingrediente	Resultado	Especies	Dosis	Exposición
Pentano	CL50 Inhalación Vapor	Rata	364 g/m³	4 horas
Isopentano	CL50 Inhalación Vapor	Rata	280000 mg/m³	4 horas
n-Hexano	CL50 Inhalación Vapor	Rata	48000 ppm	4 horas
	DL50 Oral	Rata	15840 mg/kg	-

Estimaciones de toxicidad aguda

No disponible.

Irritación/Corrosión

Nombre del producto o ingrediente	Resultado	Especies	Puntuación	Exposición	Observación
n-Hexano	Ojos - Irritante leve	Conejo	-	10 milligrams	-

Sensibilizador

Conclusión/resumen : No disponible.

Toxicidad crónica / Carcinogenicidad / Mutagénesis / Teratogenicidad / Toxicidad para la reproducción

No disponible.

Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición única

Nombre del producto o ingrediente	Categoría	Vía de exposición	Órganos destino
Pentano	Categoría 3	No aplicable.	Efectos narcóticos
Isopentano	Categoría 3	No aplicable.	Efectos narcóticos
n-Hexano	Categoría 3	No aplicable.	Efectos narcóticos

Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición repetida

Nombre del producto o ingrediente	Categoría	Vía de exposición	Órganos destino
n-Hexano	Categoría 2	No determinado	No determinado

Peligro de aspiración

Nombre del producto o ingrediente	Resultado
Pentano	PELIGRO POR ASPIRACIÓN - Categoría 1
Isopentano	PELIGRO POR ASPIRACIÓN - Categoría 1
n-Hexano	PELIGRO POR ASPIRACIÓN - Categoría 1

Información sobre posibles vías de exposición : Rutas de entrada previstas: Inhalación.

Efectos agudos potenciales para la salud

Inhalación : En concentraciones muy altas, pueden desplazar el aire normal y provocar asfixia a causa de la falta de oxígeno.

SECCIÓN 11. Información toxicológica

- Ingestión** : Como este producto es un gas, refiérase a la sección de inhalación.
- Contacto con la piel** : ☒ Contacto con gas que se expande rápidamente puede causar quemaduras o congelación.
- Contacto con los ojos** : ☒ Contacto con gas que se expande rápidamente puede causar quemaduras o congelación.

Síntomas relacionados con las características físicas, químicas y toxicológicas

- Inhalación** : Ningún dato específico.
- Ingestión** : Ningún dato específico.
- Contacto con la piel** : ☒ Ningún dato específico.
- Contacto con los ojos** : Ningún dato específico.

Efectos retardados e inmediatos, así como efectos crónicos producidos por una exposición a corto y largo plazo**Exposición a corto plazo**

- Posibles efectos inmediatos** : No disponible.
- Posibles efectos retardados** : No disponible.

Exposición a largo plazo

- Posibles efectos inmediatos** : No disponible.
- Posibles efectos retardados** : No disponible.

Efectos crónicos potenciales para la salud

- General** : ☒ No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.
- Carcinogenicidad** : No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.
- Mutagénesis** : No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.
- Teratogenicidad** : No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.
- Efectos de desarrollo** : No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.
- Efectos sobre la fertilidad** : No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.

SECCIÓN 12. Información ecológica**12.1 Toxicidad**

Nombre del producto o ingrediente	Resultado	Especies	Exposición
<input checked="" type="checkbox"/> n-Hexano	Agudo CL50 113000 µg/l Agua fresca	Pescado - Oreochromis mossambicus	96 horas

12.2 Persistencia y degradabilidad

No disponible.

Nombre del producto o ingrediente	Vida media acuática	Fotólisis	Biodegradabilidad
<input checked="" type="checkbox"/> pentano	-	-	Fácil

12.3 Potencial de bioacumulación

Nombre del producto o ingrediente	LogP _{ow}	FBC	Potencial
<input checked="" type="checkbox"/> pentano	3.45	171	bajo
Isopentano	3	171	bajo
Dióxido de carbono	0.83	-	bajo
n-Hexano	4	501.187	alta

SECCIÓN 12. Información ecológica**12.4 Movilidad en el suelo**

Coeficiente de partición tierra/agua (K_{oc}) : No disponible.

Movilidad : No disponible.

12.5 Resultados de la valoración PBT y mPmB

PBT : No aplicable.

mPmB : No aplicable.

12.6 Otros efectos adversos : No se conocen efectos significativos o riesgos críticos.

SECCIÓN 13. Consideraciones relativas a la eliminación**13.1 Métodos para el tratamiento de residuos****Producto**

Métodos de eliminación : Evitar o minimizar la generación de residuos cuando sea posible. La eliminación de este producto, sus soluciones y cualquier derivado deben cumplir siempre con los requisitos de la legislación de protección del medio ambiente y eliminación de desechos y todos los requisitos de las autoridades locales. Desechar los sobrantes y productos no reciclables por medio de un contratista autorizado a su eliminación. Los residuos no se deben tirar por la alcantarilla sin tratar a menos que sean compatibles con los requisitos de todas las autoridades con jurisdicción.




Residuos Peligrosos : La clasificación del producto puede cumplir los criterios de mercancía peligrosa.

Empaquetado

Métodos de eliminación : Evitar o minimizar la generación de residuos cuando sea posible. Los recipientes a presión vacíos deben devolverse al proveedor. Los envases residuales deben reciclarse. Sólo se deben contemplar la incineración o el enterramiento cuando el reciclaje no sea factible.

Precauciones especiales : Elimínense los residuos del producto y sus recipientes con todas las precauciones posibles. Los envases vacíos o los revestimientos pueden retener residuos del producto. No perforar o incinerar el contenedor.

SECCIÓN 14. Información relativa al transporte

	ADR/RID	IMDG	IATA
14.1 Número ONU	UN1971	UN1971	UN1971
14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	GAS NATURAL COMPRIMIDO	NATURAL GAS, COMPRESSED	Natural gas, compressed
14.3 Clase(s) de peligro para el transporte	2 	2.1 	2.1 
14.4 Grupo de embalaje	-	-	-
14.5 Peligros para el medio ambiente	No.	No.	No.

SECCIÓN 14. Información relativa al transporte

Información adicional	Número de identificación de peligros 23 Cantidad limitada 0 Previsiones especiales 660, 662 Código para túneles (B/D)	Emergency schedules (EmS) F-D, S-U	Aeronave de pasajeros y carga Limitación de cantidad: Prohibido Instrucciones de embalaje: Forbidden Sólo aeronave de carga Limitación de cantidad: 150 kg Instrucciones de embalaje: 200 Cantidades limitadas - Aeronave de pasajeros Limitación de cantidad: Prohibido Instrucciones de embalaje: Forbidden Previsiones especiales A1
------------------------------	--	--	--

14.6 Precauciones particulares para los usuarios

: Transporte dentro de las premisas de usuarios: siempre transporte en recipientes cerrados que estén verticales y seguros. Asegurar que las personas que transportan el producto conocen qué hacer en caso de un accidente o derrame.

14.7 Transporte a granel con arreglo al anexo II del Convenio MARPOL y el Código IBC

: No disponible.

SECCIÓN 15. Información reglamentaria**15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla****Reglamento de la UE (CE) nº. 1907/2006 (REACH)****Anexo XIV - Lista de sustancias sujetas a autorización****Anexo XIV**

Ninguno de los componentes está listado.

Sustancias altamente preocupantes

Ninguno de los componentes está listado.

Anexo XVII -

: No aplicable.

Restricciones a la fabricación, la comercialización y el uso de determinadas sustancias, mezclas y artículos peligrosos

Otras regulaciones de la UE**Inventario de Europa**

: Todos los componentes están listados o son exentos.

Emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación) - Aire

: Listado

Nombre del producto o ingrediente	Efectos carcinogénicos	Efectos mutagénicos	Efectos de desarrollo	Efectos sobre la fertilidad
n-hexano	-	-	-	Repr. 2, H361f (Fertilidad)

Directiva Seveso

SECCIÓN 15. Información reglamentaria

☒ Este producto está controlado bajo la Directiva Seveso.

Sustancias indentificadas**Nombre**

☒ Liquefied flammable gases, Category 1 or 2 (including LPG) and natural gas
 Oxygen
 Liquefied flammable gases, Category 1 or 2 (including LPG) and natural gas
 Liquefied flammable gases, Category 1 or 2 (including LPG) and natural gas
 Liquefied flammable gases, Category 1 or 2 (including LPG) and natural gas

Criterios de peligro**Categoría**

☒ 2: Gases inflamables

Regulaciones Internacionales**Sustancias químicas incluidas en la lista I, II y III de la Convención sobre armas químicas**

No inscrito.

Protocolo de Montreal (Anexos A, B, C, E)

No inscrito.

Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes

No inscrito.

Convención de Rotterdam sobre el consentimiento informado previo (CIP)

No inscrito.

Protocolo de Aarhus sobre metales pesados y COP de la CEPE

No inscrito.

Listas internacionales**Inventario nacional**

Australia	: Todos los componentes están listados o son exentos.
Canadá	: Todos los componentes están listados o son exentos.
China	: Todos los componentes están listados o son exentos.
Japón	: <input checked="" type="checkbox"/> Inventario de Sustancias de Japón (ENCS) : Todos los componentes están listados o son exentos. Inventario de Sustancias de Japón (ISHL) : Todos los componentes están listados o son exentos.
Malasia	: <input checked="" type="checkbox"/> No determinado.
Nueva Zelandia	: <input checked="" type="checkbox"/> Todos los componentes están listados o son exentos.
Filipinas	: <input checked="" type="checkbox"/> Todos los componentes están listados o son exentos.
República de Corea	: <input checked="" type="checkbox"/> Todos los componentes están listados o son exentos.
Taiwán	: <input checked="" type="checkbox"/> Todos los componentes están listados o son exentos.
Turquía	: <input checked="" type="checkbox"/> No determinado.
Estados Unidos	: Todos los componentes están listados o son exentos.

15.2 Evaluación de la seguridad química : ☒ Este producto contiene sustancias para las que evaluaciones de la seguridad química todavía podrían ser necesarias.

SECCIÓN 16. Otra información


☒ Indica la información que ha cambiado desde la edición de la versión anterior.


SECCIÓN 16. Otra información

Abreviaturas y acrónimos : ETA = Estimación de Toxicidad Aguda
 CLP = Reglamento sobre Clasificación, Etiquetado y Envasado [Reglamento (CE) No 1272/2008]
 DNEL = Nivel sin efecto derivado
 Indicación EUH = Indicación de Peligro específica del CLP
 PNEC = Concentración Prevista Sin Efecto
 RRN = Número de Registro REACH

Procedimiento utilizado para deducir la clasificación según el Reglamento (CE) nº. 1272/2008 [CLP/SGA]

Clasificación	Justificación
Flam. Gas 1, H220	En base a datos de ensayos
Press. Gas Comp. Gas, H280	En base a datos de ensayos

Texto completo de las frases H abreviadas :  H220 Gas extremadamente inflamable.
 H224 Líquido y vapores extremadamente inflamables.
 H225 Líquido y vapores muy inflamables.
 H280 Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.
 H304 Puede ser mortal en caso de ingestión y penetración en las vías respiratorias.
 H315 Provoca irritación cutánea.
 H336 Puede provocar somnolencia o vértigo.
 H361f (Fertilidad) Se sospecha que perjudica la fertilidad.
 H373 Puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas.
 H411 Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Texto completo de las clasificaciones [CLP/SGA] :  Aquatic Chronic 2, H411 PELIGRO ACUÁTICO A LARGO PLAZO - Categoría 2
 Asp. Tox. 1, H304 PELIGRO POR ASPIRACIÓN - Categoría 1
 EUH066 La exposición repetida puede provocar sequedad o formación de grietas en la piel.
 Flam. Gas 1, H220 GASES INFLAMABLES - Categoría 1
 Flam. Liq. 1, H224 LÍQUIDOS INFLAMABLES - Categoría 1
 Flam. Liq. 2, H225 LÍQUIDOS INFLAMABLES - Categoría 2
 Press. Gas Comp. Gas, H280 GASES A PRESIÓN - Gas comprimido
 Repr. 2, H361f (Fertilidad) TOXICIDAD PARA LA REPRODUCCIÓN (Fertilidad) - Categoría 2
 Skin Irrit. 2, H315 CORROSIÓN O IRRITACIÓN CUTÁNEAS - Categoría 2
 STOT RE 2, H373 TOXICIDAD ESPECÍFICA EN DETERMINADOS ÓRGANOS (STOT) - EXPOSICIONES REPETIDAS - Categoría 2
 STOT SE 3, H336 TOXICIDAD ESPECÍFICA EN DETERMINADOS ÓRGANOS (STOT) - EXPOSICIÓN ÚNICA (Efectos narcóticos) - Categoría 3

Fecha de emisión/ Fecha de revisión : 23/02/2016

Fecha de la emisión anterior : 30/04/2014.

Versión : 4

Aviso al lector

Exención de responsabilidad: La información contenida en este documento está basada en el estado de conocimientos de Agilent en el momento de su elaboración. No se ofrece garantía alguna, expresa o implícita, en cuanto a su exactitud, integridad o idoneidad para un propósito particular.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Fecha de revisión 07.12.2015

Versión 17.0

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis
Número de registro REACH	01-2119486455-28-XXXX
No. CAS	141-43-5

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados	Producto químico para síntesis En cumplimiento de las condiciones descritas en el anexo a esta hoja de datos de seguridad.
--------------------	---

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía	Merck KGaA * 64271 Darmstadt * Alemania * Tel: +49 6151 72-0
Departamento Responsable	EQ-RS * e-mail: prodsafe@merckgroup.com

1.4 Teléfono de emergencia Instituto Nacional de Toxicología * Madrid * Tel: 91 562 04 20

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación (REGLAMENTO (CE) No 1272/2008)

Toxicidad aguda, Categoría 4, Oral, H302
Toxicidad aguda, Categoría 4, Inhalación, H332
Toxicidad aguda, Categoría 4, Cutáneo, H312
Corrosión cutánea, Categoría 1B, H314

Para el texto íntegro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

Clasificación (67/548/CEE o 1999/45/CE)

Xn	Nocivo	R20/21/22
C	Corrosivo	R34

El texto completo de las frases R mencionadas en esta sección, se indica en la Sección 16.

2.2 Elementos de la etiqueta

Etiquetado (REGLAMENTO (CE) No 1272/2008)

Pictogramas de peligro



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

H302 + H312 + H332 Nocivo en caso de ingestión, contacto con la piel o inhalación

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número 800849
Denominación Etanolamina para síntesis

H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.

Consejos de prudencia

Prevención

P280 Llevar guantes/ prendas/ gafas/ máscara de protección.

Intervención

P301 + P330 + P331 EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito.

P302 + P352 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.

P305 + P351 + P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.

P308 + P310 EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA o a un médico.

Etiquetado reducido (≤ 125 ml)

Pictogramas de peligro



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.

Consejos de prudencia

P280 Llevar guantes/ prendas/ gafas/ máscara de protección.

P301 + P330 + P331 EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito.

P305 + P351 + P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.

P308 + P310 EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA o a un médico.

No. Índice 603-030-00-8

2.3 Otros peligros

Ninguno conocido.

SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes

3.1 Sustancia

Formula	$\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	$\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$ (Hill)
No. Índice	603-030-00-8	
No. CE	205-483-3	
Masa molar	61,08 g/mol	

Componentes peligrosos (REGLAMENTO (CE) No 1272/2008)

Nombre químico (Concentración)

No. CAS Número de registro Clasificación

Etanolamina (≤ 100 %)

La sustancia no cumple los criterios de PBT o mPmB según el Reglamento (CE) n.º. 1907/2006, anexo XIII.

141-43-5 01-2119486455-28-XXXX

Toxicidad aguda, Categoría 4, H302

Toxicidad aguda, Categoría 4, H332

Toxicidad aguda, Categoría 4, H312

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

Corrosión cutáneas, Categoría 1B, H314

Para el texto íntegro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

Componentes peligrosos (1999/45/CE)

Nombre químico (Concentración)

No. CAS Clasificación

Etanolamina (<= 100 %)

141-43-5 Xn, Nocivo; R20/21/22

C, Corrosivo; R34

El texto completo de las frases R mencionadas en esta sección, se indica en la Sección 16.

3.2 Mezcla

No aplicable

SECCIÓN 4. Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios

Recomendaciones generales

El socorrista necesita protegerse a sí mismo.

Tras inhalación: aire fresco. Llamar al médico.

En caso de contacto con la piel: Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas.

Aclararse la piel con agua/ ducharse. Llame inmediatamente al médico.

Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua. Llamar inmediatamente al oftalmólogo.

Tras ingestión: hacer beber agua (máximo 2 vasos), evitar el vómito (¡peligro de perforación!).

Llame inmediatamente al médico. No proceder a pruebas de neutralización.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Irritación y corrosión, bronquitis, Tos, Insuficiencia respiratoria, Somnolencia, Náusea

¡Riesgo de ceguera!

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

No hay información disponible.

SECCIÓN 5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción

Medios de extinción apropiados

Agua, Espuma, Dióxido de carbono (CO₂), Polvo seco

Medios de extinción no apropiados

No existen limitaciones de agentes extinguidores para esta sustancia/mezcla.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Inflamable.

Los vapores son más pesados que el aire y pueden expandirse a lo largo del suelo.

En caso de fuerte calentamiento pueden producirse mezclas explosivas con el aire.

En caso de incendio posible formación de gases de combustión o vapores peligrosos.

El fuego puede provocar emanaciones de:

gases nitrosos, óxidos de nitrógeno

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

Equipo de protección especial para el personal de lucha contra incendios

Permanencia en el área de riesgo solo con sistemas de respiración artificiales e independientes del ambiente. Protección de la piel mediante observación de una distancia de seguridad y uso de ropa protectora adecuada.

Otros datos

Separar el recipiente de la zona de peligro y refrigerarlo con agua. Reprimir los gases/vapores/neblinas con agua pulverizada. Impedir la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas por el agua que ha servido a la extinción de incendios.

SECCIÓN 6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Indicaciones para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia: No respirar los vapores, aerosoles. Evitar el contacto con la sustancia. Asegúrese una ventilación apropiada. Manténgase alejado del calor y de las fuentes de ignición. Evacúe el área de peligro, respete los procedimientos de emergencia, consulte con expertos.

Consejos para el personal de emergencia:

Equipo protector véase sección 8.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza

Cubra las alcantarillas. Recoja, una y aspire los derrames. Observe posibles restricciones de materiales (véanse indicaciones en las secciones 7 o 10). Recoger con material absorbente de líquidos y neutralizante, p. ej. con Chemizorb® OH⁻ (art. Merck 101596). Proceder a la eliminación de los residuos. Aclarar.

6.4 Referencia a otras secciones

Para indicaciones sobre el tratamiento de residuos, véase sección 13.

SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Precauciones para una manipulación segura

Consejos para una manipulación segura

Observar las indicaciones de la etiqueta.

Trabajar bajo campana extractora. No inhalar la sustancia/la mezcla. Evite la generación de vapores/aerosoles.

Indicaciones para la protección contra incendio y explosión

Mantener apartado de las llamas abiertas, de las superficies calientes y de los focos de ignición. Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.

Medidas de higiene

Sustituir inmediatamente la ropa contaminada. Protección preventiva de la piel. Lavar cara y manos al término del trabajo.

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Condiciones de almacenamiento

Bien cerrado.

Temperatura de almacenaje recomendada indicada en la etiqueta del producto.

7.3 Usos específicos finales

Véase el escenario de exposición en el anexo de esta FDS.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número 800849
Denominación Etanolamina para síntesis

SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual

8.1 Parámetros de control

Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.

Componentes

Base	Valor	Límites umbrales	Observaciones
<i>Etanolamina (141-43-5)</i>			
EU ELV	Límite máximo permisible de exposición promedio ponderado en tiempo	1 ppm 2,5 mg/m ³	
	Límite Permisible Temporal:	3 ppm 7,6 mg/m ³	
	Clasificación de riesgo a la piel:		Absorción potencial a través de la piel.
	Clasificación de riesgo a la piel:		Absorción potencial a través de la piel.
VLA (ES)	Valor Límite Ambiental-Exposición de Corta Duración (VLA-EC)	3 ppm 7,5 mg/m ³	
	Valor Límite Ambiental-Exposición Diaria (VLA-ED)	1 ppm 2,5 mg/m ³	

Nivel sin efecto derivado (DNEL)

DNEL trabajador, crónico	efectos sistémicos	dérmica	1 mg/kg Peso corporal
DNEL trabajador, crónico	Efectos locales	inhalativo	3,3 mg/m ³
DNEL consumidor, prolongado	efectos sistémicos	dérmica	0,24 mg/kg Peso corporal
DNEL consumidor, prolongado	Efectos locales y sistémicos	inhalativo	2 mg/m ³
DNEL consumidor, prolongado	efectos sistémicos	oral	3,75 mg/kg Peso corporal

Procedimientos de control recomendados

Los métodos para la medición de la atmósfera del puesto de trabajo deben cumplir con los requisitos de las normas DIN EN 482 y DIN EN 689.

Concentración prevista sin efecto (PNEC)

PNEC Agua dulce	0,085 mg/l
PNEC Agua de mar	0,0085 mg/l
PNEC Liberación periódica al agua	0,025 mg/l
PNEC sistema de depuración de aguas residuales	100 mg/l
PNEC Sedimento	0,425 mg/kg
PNEC Sedimento marino	0,0425 mg/kg
PNEC Suelo	0,035 mg/kg

8.2 Controles de la exposición

Disposiciones de ingeniería

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número 800849
Denominación Etanolamina para síntesis

Medidas técnicas y observación de métodos adecuados de trabajo tienen prioridad ante el uso de equipos de protección personal.
Véase sección 7.1.

Medidas de protección individual

Los tipos de auxiliares para protección del cuerpo deben elegirse específicamente según el puesto de trabajo en función de la concentración y cantidad de la sustancia peligrosa. Debería aclararse con el suministrador la estabilidad de los medios protectores frente a los productos químicos.

Protección de los ojos / la cara

Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro

Protección de las manos

Sumergir:

Material del guante:	Latex natural
Espesor del guante:	0,6 mm
tiempo de penetración:	> 480 min

Salpicaduras:

Material del guante:	Caucho nitrilo
Espesor del guante:	0,11 mm
tiempo de penetración:	> 10 min

Los guantes de protección indicados deben cumplir con las especificaciones de la Directiva 89/686/EEC y con su norma resultante EN374, por ejemplo KCL 706 Lapren® (Sumergir), KCL 741 Dermatrill® L (Salpicaduras).

Los tiempos de ruptura mencionados anteriormente han sido determinados con muestras de material de los tipos de guantes recomendados en mediciones de laboratorio de KCL según EN374.

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN374, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)

Otras medidas de protección

Vestimenta protectora antiestática retardante de la flama.

Protección respiratoria

necesaria en presencia de vapores/aerosoles.

Tipo de Filtro recomendado: Filtro A

El empresario debe garantizar que el mantenimiento, la limpieza y la prueba técnica de los protectores respiratorios se hagan según las instrucciones del productor de las mismas. Estas medidas deben ser documentadas debidamente.

Controles de exposición medioambiental

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

SECCIÓN 9. Propiedades físicas y químicas

9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

Forma	Líquido
Color	Incoloro
Olor	Amoniacal

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

Umbral olfativo	No hay información disponible.
pH	12,1 a 100 g/l 20 °C
Punto de fusión	10,5 °C
Punto /intervalo de ebullición	171 °C a 1.013 hPa
Punto de inflamación	92,5 °C Método: DIN 51758
Tasa de evaporación	No hay información disponible.
Inflamabilidad (sólido, gas)	No hay información disponible.
Límite de explosión, inferior	3,4 %(v)
Límite de explosión, superior	27 %(v)
Presión de vapor	0,5 hPa a 20 °C
Densidad relativa del vapor	2,1
Densidad	1,02 g/cm ³ a 20 °C
Densidad relativa	No hay información disponible.
Solubilidad en agua	a 20 °C soluble
Coefficiente de reparto n-octanol/agua	log Pow: -1,91 (25 °C) Directrices de ensayo 107 del OECD No es de esperar una bioacumulación.
Temperatura de auto-inflamación	No hay información disponible.
Temperatura de descomposición	No hay información disponible.
Viscosidad, dinámica	No hay información disponible.
Propiedades explosivas	No clasificado/a como explosivo/a.
Propiedades comburentes	ningún

9.2 Otros datos

Temperatura de ignición	410 °C Método: DIN 51794
-------------------------	-----------------------------

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

Viscosidad, cinemática	20 mm ² /s a 23 °C
------------------------	----------------------------------

SECCIÓN 10. Estabilidad y reactividad

10.1 Reactividad

En caso de fuerte calentamiento pueden producirse mezclas explosivas con el aire.
Debe considerarse crítico un intervalo a partir de aprox. 15 Kelvin por debajo del punto de inflamación.

10.2 Estabilidad química

Sensible al aire.
higroscópico

10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas

Reacción exotérmica con:

acroleína, Nitrilos, ácido clorosulfónico, Gas cloruro de hidrógeno, ácido acético, Anhídrido acético, oleum/ácido sulfúrico, Ácido nítrico, Ácido sulfúrico, ácidos minerales, acetato de vinilo, Oxidantes

Peligro de ignición o de formación de gases o vapores combustibles con:

azufre, compuestos ferricos

¡Cuidado. En contacto con nitritos, nitratos, ácido nitroso posible liberación de nitrosaminas!

10.4 Condiciones que deben evitarse

Calentamiento fuerte.

10.5 Materiales incompatibles

goma, Cobre, Aleaciones de cobre

10.6 Productos de descomposición peligrosos

en caso de incendio: véase sección 5.

SECCIÓN 11. Información toxicológica

11.1 Información sobre los efectos toxicológicos

Toxicidad oral aguda

DL50 Rata: 1.515 mg/kg

(Ficha de datos de Seguridad externa)

Síntomas: Si es ingerido, provoca quemaduras severas de la boca y la garganta, así como peligro de perforación del esófago y del estómago.
absorción

Toxicidad aguda por inhalación

Estimación de la toxicidad aguda: 11,1 mg/l; vapor

Juicio de expertos

Síntomas: irritación de las mucosas, Insuficiencia respiratoria, Tos, Consecuencias posibles; bronquitis, perjudica las vías respiratorias

absorción

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

Toxicidad cutánea aguda

DL50 Conejo: 1.025 mg/kg
(IUCLID)

absorción

Irritación de la piel

Conejo

Resultado: Provoca quemaduras.

(IUCLID)

Provoca quemaduras.

Irritación ocular

Conejo

Resultado: Provoca quemaduras.

(IUCLID)

Provoca lesiones oculares graves.

¡Riesgo de ceguera!

Sensibilización

Esta información no está disponible.

Mutagenicidad en células germinales

Genotoxicidad in vivo

Prueba de micronúcleos in vivo

Ratón

oral

Resultado: negativo

Método: OECD TG 474

Genotoxicidad in vitro

Prueba de Ames

Salmonella typhimurium

Resultado: negativo

(IUCLID)

Mutagenicidad (ensayo de células de mamífero):

Linfocitos humanos

Resultado: negativo

(IUCLID)

Carcinogenicidad

Esta información no está disponible.

Toxicidad para la reproducción

Esta información no está disponible.

Teratogenicidad

Esta información no está disponible.

Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única

Esta información no está disponible.

Toxicidad específica en determinados órganos - exposiciones repetidas

Esta información no está disponible.

Peligro de aspiración

Esta información no está disponible.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

11.2 Otros datos

Tras absorción:

Náusea, Somnolencia

Perjudicial para:

Ripón, Hígado

Bajo determinadas condiciones pueden formarse nitrosaminas a partir de nitritos o de ácido nitroso. Las nitrosaminas demostraron ser cancerígenas en ensayos sobre animales.

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad.

SECCIÓN 12. Información ecológica

12.1 Toxicidad

Toxicidad para los peces

CL50 *Oncorhynchus mykiss* (Trucha irisada): 150 mg/l; 96 h
neutro (IUCLID)

Toxicidad para las dafnias y otros invertebrados acuáticos

EC5 *E. sulcatum*: 45 mg/l; 72 h
neutro (IUCLID)

CE50 *Daphnia magna* (Pulga de mar grande): 65 mg/l; 48 h
(IUCLID)

Toxicidad para las algas

IC50 *Desmodesmus subspicatus* (alga verde): 22 mg/l; 72 h
(IUCLID)

IC5 *Scenedesmus quadricauda* (alga verde): 0,75 mg/l; 8 d
neutro (IUCLID)

Toxicidad para las bacterias

CE50 Iodo activado: > 1.000 mg/l; 3 h
OECD TG 209

12.2 Persistencia y degradabilidad

Biodegradabilidad

90 - 100 %; 28 d

OECD TG 301F

Fácilmente biodegradable.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

800 mg/g (5 d)

(IUCLID)

Demanda teórica de oxígeno (DTO)

1.310 mg/g

(IUCLID)

12.3 Potencial de bioacumulación

Coefficiente de reparto n-octanol/agua

log Pow: -1,91 (25 °C)

Directrices de ensayo 107 del OECD

No es de esperar una bioacumulación.

12.4 Movilidad en el suelo

No hay información disponible.

12.5 Resultados de la valoración PBT y mPmB

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

La sustancia no cumple los criterios de PBT o mPmB según el Reglamento (CE) n.º 1907/2006, anexo XIII.

12.6 Otros efectos adversos

Información ecológica complementaria

Efectos biológicos:

Efecto perjudicial por desviación del pH.

No deben esperarse interferencias en depuradoras biológicas si se maneja adecuadamente el producto.

La descarga en el ambiente debe ser evitada.

SECCIÓN 13. Consideraciones relativas a la eliminación

Métodos para el tratamiento de residuos

Directiva sobre residuos 2008/98 nota / CE.

Los residuos deben eliminarse de acuerdo con normativas locales y nacionales. Deje los productos químicos en sus recipientes originales. No los mezcle con otros residuos. Maneje los recipientes sucios como el propio producto.

Consulte en www.retrologistik.com sobre procesos relativos a la devolución de productos químicos o recipientes, o contáctenos si tiene más preguntas.

SECCIÓN 14. Información relativa al transporte

Transporte por carretera (ADR/RID)

14.1 Número ONU	UN 2491
14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	Etanolamina
14.3 Clase	8
14.4 Grupo de embalaje	III
14.5 Peligrosas ambientalmente	--
14.6 Precauciones particulares para los usuarios	si
Código de restricciones en túneles	E

Transporte fluvial (ADN)

No relevante

Transporte aéreo (IATA)

14.1 Número ONU	UN 2491
14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	ETHANOLAMINE
14.3 Clase	8
14.4 Grupo de embalaje	III
14.5 Peligrosas ambientalmente	--
14.6 Precauciones particulares para los usuarios	no

Transporte marítimo (IMDG)

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

14.1 Número ONU	UN 2491
14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	ETHANOLAMINE
14.3 Clase	8
14.4 Grupo de embalaje	III
14.5 Peligrosas ambientalmente	--
14.6 Precauciones particulares para los usuarios	si
EmS	F-A S-B
14.7 Transporte a granel con arreglo al anexo II del Convenio Marpol 73/78 y del Código IBC	No relevante

SECCIÓN 15. Información reglamentaria

15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

Disposiciones legales de la CE

Legislación de Peligro de Accidente Importante Alemán	SEVESO III No aplicable
---	----------------------------

Restricciones profesionales	Tomar nota de la Directiva 94/33/CEE sobre la protección laboral de los jóvenes. Obsérvense las restricciones considerando la protección maternal de acuerdo con la Directiva del Consejo 92/85/CEE o regulaciones más rigurosas nacionales.
-----------------------------	--

Reglamento 1005/2009/CE relativo a sustancias que agotan la capa de ozono	no regulado
---	-------------

Reglamento (CE) nº 850/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004 sobre contaminantes orgánicos persistentes que modifica la Directiva 79/117/CEE	no regulado
---	-------------

Sustancias extremadamente preocupantes (SVHC)	Este producto no contiene sustancias extremadamente preocupantes por encima del límite legal de concentración correspondiente ($\geq 0,1$ % p/p) según la normativa CE n.º 1907/2006 (REACH), artículo 57.
---	---

Legislación nacional

Clase de almacenamiento	8A
-------------------------	----

15.2 Evaluación de la seguridad química

Para este producto no se realizó una valoración de la seguridad química.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

SECCIÓN 16. Otra información

Texto íntegro de las Declaraciones-H referidas en las secciones 2 y 3.

H302	Nocivo en caso de ingestión.
H312	Nocivo en contacto con la piel.
H314	Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.
H332	Nocivo en caso de inhalación.

El texto completo de las frases-R referidas en las secciones 2 y 3

R20/21/22	Nocivo por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel.
R34	Provoca quemaduras.

Consejos relativos a la formación

Debe disponer a los trabajadores la información y la formación práctica suficientes.

Etiquetado

Pictogramas de peligro



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

H227 Líquido combustible.

H302 + H312 + H332 Nocivo en caso de ingestión, contacto con la piel o inhalación

H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.

Consejos de prudencia

Prevención

P280 Llevar guantes/ prendas/ gafas/ máscara de protección.

Intervención

P301 + P330 + P331 EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito.

P302 + P352 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes.

P305 + P351 + P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.

P308 + P310 EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA o a un médico.

Etiquetado (67/548/CEE o 1999/45/CE)


Símbolo(s)  C Corrosivo

<i>Frase(s) - R</i>	20/21/22-34	Nocivo por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel. Provoca quemaduras.
---------------------	-------------	--

<i>Frase(s) - S</i>	26-36/37/39-45	En caso de contacto con los ojos, lavarse inmediata y abundantemente con agua y acudir a un médico. Usar indumentaria y guantes adecuados y protección para los ojos/la cara. En caso de accidente o malestar, acudir
---------------------	----------------	---

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número 800849
Denominación Etanolamina para síntesis

		inmediatamente al médico (si es posible, muéstrese la etiqueta).
No. CE	205-483-3	Etiqueta CE
Etiquetado reducido (≤ 125 ml)		
Símbolo(s)  C		Corrosivo
Frase(s) - R 20/21/22-34		Nocivo por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel. Provoca quemaduras.
Frase(s) - S 26-36/37/39-45		En caso de contacto con los ojos, lávense inmediata y abundantemente con agua y acídase a un médico. Usense indumentaria y guantes adecuados y protección para los ojos/la cara. En caso de accidente o malestar, acídase inmediatamente al médico (si es posible, muéstrese la etiqueta).

Una explicación de las abreviaturas y los acrónimos utilizados en la ficha de datos de seguridad
Puede consultar las abreviaturas y acrónimos utilizados en www.wikipedia.org.

Representante regional

Merck Chemical and Life Science, S.A.
Avenida de Burgos, 114|28050 Madrid| España |
Tel: +34 935655500 | Fax: +34 935440000 | email:SCM.Chemicals.ES@merckgroup.com |
www.merck.es

Los datos suministrados en esta ficha de seguridad se basan a nuestro actual conocimiento. Describen tan solo las medidas de seguridad en el manejo de este producto y no representan una garantía sobre las propiedades descritas del mismo.

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

ESCENARIOS DE EXPOSICIÓN 1 (Uso industrial)

1. Uso industrial (Producto químico para síntesis)

Sectores de uso final

- SU 3* Usos industriales: Usos de sustancias como tales o en preparados en emplazamientos industriales
- SU 9* Fabricación de productos químicos finos
- SU 10* Formulación [mezcla] de preparados y/ o reenvasado (sin incluir aleaciones)

Categoría de productos químicos

- PC19* Sustancias intermedias
- PC21* Productos químicos de laboratorio

Categorías de proceso

- PROC1* Uso en procesos cerrados, exposición improbable
- PROC2* Utilización en procesos cerrados y continuos con exposición ocasional controlada
- PROC3* Uso en procesos por lotes cerrados (síntesis o formulación)
- PROC4* Utilización en procesos por lotes y de otro tipo (síntesis) en los que se puede producir la exposición
- PROC5* Mezclado en procesos por lotes para la formulación de preparados y artículos (fases múltiples y/ o contacto significativo)
- PROC8a* Transferencia de sustancias o preparados (carga/ descarga) de o hacia buques o grandes contenedores en instalaciones no especializadas
- PROC8b* Transferencia de sustancias o preparados (carga/ descarga) de o hacia buques o grandes contenedores en instalaciones especializadas
- PROC9* Transferencia de sustancias o preparados en pequeños contenedores (líneas de llenado especializadas, incluido el pesaje)
- PROC10* Aplicación mediante rodillo o brocha
- PROC14* Producción de preparados o artículos por tableado, compresión, extrusión, peletización
- PROC15* Uso como reactivo de laboratorio

Categorías de emisión al medio ambiente

- ERC2* Formulación de preparados
- ERC4* Uso industrial de auxiliares tecnológicos en procesos y productos, que no forman parte de artículos
- ERC6a* Uso industrial que da lugar a la fabricación de otra sustancia (uso de sustancias intermedias)

2. Escenario contributivo: condiciones de operación y medidas de gestión de riesgos

2.1 Escenario de contribución que controla la exposición ambiental para: ERC2, SpERC AISE 2

Cantidad utilizada

Cantidad diaria por emplazamiento (Mseguro)	61.639 kg
---	-----------

Factores ambientales no influenciados por la gestión de riesgos

Velocidad de flujo	18.000 000043
Factor de dilución (R _{vo})	10
Factor de dilución (Áreas Costeras)	100

Otras condiciones operacionales dadas que afectan la exposición ambiental

Número de días de emisión al año	220
----------------------------------	-----

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD – Anexo
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

Factor de emisión o de descarga:	0,00 %
Aire	
Factor de emisión o de descarga:	0,01 %
Agua	
Factor de emisión o de descarga:	0,00 %
Suelo	

Condiciones y medidas relacionadas con la planta municipal de tratamiento de aguas residuales

Tipo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	Planta municipal de tratamiento de aguas residuales
Velocidad de flujo del efluente en la planta de tratamiento de aguas residuales	2.000 000043
Eficacia (de una medida)	87 %
Tratamiento de Lodos	Lodos residuales no deben ser desechados a la naturaleza.

2.2 Escenario de contribución que controla la exposición ambiental para: ERC4

Cantidad utilizada

Cantidad diaria por emplazamiento (Mseguro)	1.008 kg
---	----------

Factores ambientales no influenciados por la gestión de riesgos

Velocidad de flujo	18.000 000043
Factor de dilución (Rvo)	10
Factor de dilución (Áreas Costeras)	100

Otras condiciones operacionales dadas que afectan la exposición ambiental

Número de días de emisión al año	220
Factor de emisión o de descarga:	0,00 %
Aire	
Factor de emisión o de descarga:	0,00 %
Agua	
Factor de emisión o de descarga:	0,01 %
Suelo	

Condiciones y medidas relacionadas con la planta municipal de tratamiento de aguas residuales

Tipo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	Planta municipal de tratamiento de aguas residuales
Velocidad de flujo del efluente en la planta de tratamiento de aguas residuales	2.000 000043
Eficacia (de una medida)	87 %
Tratamiento de Lodos	Lodos residuales no deben ser desechados a la naturaleza.

2.3 Escenario de contribución que controla la exposición ambiental para: ERC6a

Cantidad utilizada

Cantidad diaria por emplazamiento (Mseguro)	73.899 kg
---	-----------

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD – Anexo
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

Factores ambientales no influenciados por la gestión de riesgos

Velocidad de flujo	18.000 000043
Factor de dilución (Rvo)	10
Factor de dilución (Áreas Costeras)	100

Otras condiciones operacionales dadas que afectan la exposición ambiental

Número de días de emisión al año	300
Factor de emisión o de descarga: Aire	0,00 %
Factor de emisión o de descarga: Agua	0,00 %
Factor de emisión o de descarga: Suelo	0,01 %

Condiciones y medidas relacionadas con la planta municipal de tratamiento de aguas residuales

Tipo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	Planta municipal de tratamiento de aguas residuales
Velocidad de flujo del efluente en la planta de tratamiento de aguas residuales	2.000 000043
Eficacia (de una medida)	87 %
Tratamiento de Lodos	Lodos residuales no deben ser desechados a la naturaleza.

2.4 Escenario de contribución que controla la exposición de los trabajadores para: PROC1, PROC2

Características del producto

Concentración de la sustancia en la Mezcla/Artículo	Cubre un porcentaje de 100% de sustancia en el producto.
Forma física (en el momento del uso)	Líquido, volatilidad baja
Temperatura de procesos	< 53 °C

Frecuencia y duración del uso

Frecuencia de uso	8 horas / día
Frecuencia de uso	5 días / semana

Otras condiciones operacionales que afectan a la exposición de los trabajadores

Al exterior / Al Interior	Zona interior sin aspiración local (LEV)
---------------------------	--

Condiciones y medidas relacionadas con la protección personal, la higiene y la evaluación de la salud

Utilice guantes resistentes a productos químicos (conforme a EN374) en combinación con controles de supervisión de gestión intensiva. Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro

Consejos adicionales para las buenas prácticas más allá de la Evaluación de Seguridad Química REACH

Asesoramiento adicional sobre buenas prácticas	Utilice indumentaria adecuada para evitar la exposición de la piel.
--	---

2.5 Escenario de contribución que controla la exposición de los trabajadores para: PROC3

Características del producto

Concentración de la sustancia en la Mezcla/Artículo	Cubre un porcentaje de 100% de sustancia en el producto.
---	--

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD – Anexo
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

Forma física (en el momento del uso)	Líquido, volatilidad baja
Temperatura de procesos	< 53 °C

Frecuencia y duración del uso

Frecuencia de uso	8 horas / día
Frecuencia de uso	5 días / semana

Otras condiciones operacionales que afectan a la exposición de los trabajadores

Al exterior / Al Interior	Zona interior con aspiración local (LEV)
---------------------------	--

Condiciones y medidas relacionadas con la protección personal, la higiene y la evaluación de la salud

Utilice guantes resistentes a productos químicos (conforme a EN374) en combinación con controles de supervisión de gestión intensiva. Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro

Consejos adicionales para las buenas prácticas más allá de la Evaluación de Seguridad Química REACH

Asesoramiento adicional sobre buenas prácticas	Utilice indumentaria adecuada para evitar la exposición de la piel.
--	---

2.6 Escenario de contribución que controla la exposición de los trabajadores para: PROC4

Características del producto

Concentración de la sustancia en la Mezcla/Artículo	Cubre un porcentaje de sustancia en el producto hasta un 2,5 %.
Forma física (en el momento del uso)	Líquido, volatilidad baja
Temperatura de procesos	< 53 °C

Frecuencia y duración del uso

Frecuencia de uso	8 horas / día
Frecuencia de uso	5 días / semana

Otras condiciones operacionales que afectan a la exposición de los trabajadores

Al exterior / Al Interior	Zona interior sin aspiración local (LEV)
---------------------------	--

Condiciones y medidas relacionadas con la protección personal, la higiene y la evaluación de la salud

Utilice guantes resistentes a productos químicos (conforme a EN374) en combinación con un entrenamiento 'básico' de los empleados. Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro

Consejos adicionales para las buenas prácticas más allá de la Evaluación de Seguridad Química REACH

Asesoramiento adicional sobre buenas prácticas	Utilice indumentaria adecuada para evitar la exposición de la piel.
--	---

2.7 Escenario de contribución que controla la exposición de los trabajadores para: PROC5, PROC8a, PROC9, PROC14, PROC15

Características del producto

Concentración de la sustancia en la Mezcla/Artículo	Cubre un porcentaje de 100% de sustancia en el producto.
Forma física (en el momento del uso)	Líquido, volatilidad baja
Temperatura de procesos	< 53 °C

Frecuencia y duración del uso

Frecuencia de uso	8 horas / día
-------------------	---------------

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD – Anexo
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

Frecuencia de uso	5 días / semana
-------------------	-----------------

Otras condiciones operacionales que afectan a la exposición de los trabajadores

Al exterior / Al Interior	Zona interior con aspiración local (LEV)
---------------------------	--

Condiciones y medidas relacionadas con la protección personal, la higiene y la evaluación de la salud

Utilice guantes resistentes a productos químicos (conforme a EN374) en combinación con controles de supervisión de gestión intensiva. Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro

Consejos adicionales para las buenas prácticas más allá de la Evaluación de Seguridad Química REACH

Asesoramiento adicional sobre buenas prácticas	Utilice indumentaria adecuada para evitar la exposición de la piel.
--	---

2.8 Escenario de contribución que controla la exposición de los trabajadores para: PROC8b

Características del producto

Concentración de la sustancia en la Mezcla/Artículo	Cubre un porcentaje de 100% de sustancia en el producto.
Forma física (en el momento del uso)	Líquido, volatilidad baja
Temperatura de procesos	< 53 °C

Frecuencia y duración del uso

Frecuencia de uso	8 horas / día
Frecuencia de uso	5 días / semana

Otras condiciones operacionales que afectan a la exposición de los trabajadores

Al exterior / Al Interior	Zona interior con aspiración local (LEV)
---------------------------	--

Condiciones y medidas relacionadas con la protección personal, la higiene y la evaluación de la salud

Utilice guantes resistentes a productos químicos (conforme a EN374) en combinación con controles de supervisión de gestión intensiva. Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro

Consejos adicionales para las buenas prácticas más allá de la Evaluación de Seguridad Química REACH

Asesoramiento adicional sobre buenas prácticas	Utilice indumentaria adecuada para evitar la exposición de la piel.
--	---

2.9 Escenario de contribución que controla la exposición de los trabajadores para: PROC10

Características del producto

Concentración de la sustancia en la Mezcla/Artículo	Cubre un porcentaje de sustancia en el producto hasta un 10 %.
Forma física (en el momento del uso)	Líquido, volatilidad baja
Temperatura de procesos	< 53 °C

Frecuencia y duración del uso

Frecuencia de uso	8 horas / día
Frecuencia de uso	5 días / semana

Otras condiciones operacionales que afectan a la exposición de los trabajadores

Al exterior / Al Interior	Zona interior sin aspiración local (LEV)
---------------------------	--

Condiciones y medidas relacionadas con la protección personal, la higiene y la evaluación de la salud

Utilice guantes resistentes a productos químicos (conforme a EN374) en combinación con controles de

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD – Anexo
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número 800849
Denominación Etanolamina para síntesis

supervisión de gestión intensiva. Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro

Consejos adicionales para las buenas prácticas más allá de la Evaluación de Seguridad Química REACH

Asesoramiento adicional sobre buenas prácticas Utilice indumentaria adecuada para evitar la exposición de la piel.

3. Estimación de la exposición y referencia a su fuente

Medio Ambiente

CS	Descriptor de uso	Mseguro	Compartimento	RCR	Método de Evaluación de la exposición
2.1	ERC2, SpERC AISE 2	61639 kg / dva	Agua dulce	< 1	ECETOC TRA, modificado
2.2	ERC4	1008 kg / dva	Agua dulce	< 1	ECETOC TRA 2
2.3	ERC6a	73899 kg / dva	Agua dulce	< 1	ECETOC TRA 2

Trabajadores

CS	Descriptor de uso	Duración de la exposición, ruta, efecto	RCR	Método de Evaluación de la exposición
2.4	PROC1	larga duración, inhalativo, sistémico	0,01	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,01	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,02	
2.4	PROC2	larga duración, inhalativo, sistémico	0,77	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,03	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,8	
2.5	PROC3	larga duración, inhalativo, sistémico	0,23	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,01	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,24	
2.6	PROC4	larga duración, inhalativo, sistémico	0,1	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,02	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,12	
2.7	PROC5	larga duración, inhalativo, sistémico	0,39	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,27	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,66	
2.7	PROC8a	larga duración, inhalativo, sistémico	0,46	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,27	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,73	
2.7	PROC9	larga duración, inhalativo, sistémico	0,39	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,14	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,53	
2.7	PROC14	larga duración, inhalativo, sistémico	0,39	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,07	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,46	
2.7	PROC15	larga duración, inhalativo, sistémico	0,39	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,01	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,40	
2.8	PROC8b	larga duración, inhalativo, sistémico	0,39	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,14	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,53	

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD – Anexo
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número 800849
Denominación Etanolamina para síntesis

2.9	PROC10	larga duración, inhalativo, sistémico	0,77	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,05	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,82	

No se ha usado un factor de reducción de ventilación de escape local (VE L) para calcular las estimaciones de la exposición diurna.

4. Orientación al Usuario Intermedio para evaluar si trabaja dentro de los límites fijados por el Escenario de Exposición

Consulte los documentos siguientes: ECHA Guidance on information requirements and chemical safety assessment Chapter R.12: Use descriptor system; ECHA Guidance for downstream users; ECHA Guidance on information requirements and chemical safety assessment Part D: Exposure Scenario Building, Part E: Risk Characterisation and Part G: Extending the SDS; VCI/Cefic REACH Practical Guides on Exposure Assessment and Communications in the Supply Chain; CEFIC Guidance Specific Environmental Release Categories (SPERCs).

Para escalar la evaluación de la exposición laboral conducida con ECETOC TRA consulte la herramienta de Merck SciDeEx® bajo www.merckmillipore.com/scideex.

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

ESCENARIOS DE EXPOSICIÓN 2 (Uso profesional)

1. Uso profesional (Producto químico para síntesis)

Sectores de uso final

SU 22 Usos profesionales: Ambito público (administración, educación, espectáculos, servicios, artesanía)

Categoría de productos químicos

PC21 Productos químicos de laboratorio

Categorías de proceso

PROC15 Uso como reactivo de laboratorio

Categorías de emisión al medio ambiente

ERC2 Formulación de preparados

ERC6a Uso industrial que da lugar a la fabricación de otra sustancia (uso de sustancias intermedias)

2. Escenario contributivo: condiciones de operación y medidas de gestión de riesgos

2.1 Escenario de contribución que controla la exposición ambiental para: ERC2, SpERC AISE 2

Cantidad utilizada

Cantidad diaria por emplazamiento (Mseguro)	61.639 kg
--	-----------

Factores ambientales no influenciados por la gestión de riesgos

Velocidad de flujo	18.000 000043
Factor de dilución (Rvo)	10
Factor de dilución (Áreas Costeras)	100

Otras condiciones operacionales dadas que afectan la exposición ambiental

Número de días de emisión al año	220
Factor de emisión o de descarga: Aire	0,00 %
Factor de emisión o de descarga: Agua	0,01 %
Factor de emisión o de descarga: Suelo	0,00 %

Condiciones y medidas relacionadas con la planta municipal de tratamiento de aguas residuales

Tipo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	Planta municipal de tratamiento de aguas residuales
Velocidad de flujo del efluente en la planta de tratamiento de aguas residuales	2.000 000043
Eficacia (de una medida)	87 %
Tratamiento de Lodos	Lodos residuales no deben ser desechados a la naturaleza.

2.2 Escenario de contribución que controla la exposición ambiental para: ERC6a

Cantidad utilizada

Cantidad diaria por emplazamiento	73.899 kg
-----------------------------------	-----------

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD – Anexo
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número	800849
Denominación	Etanolamina para síntesis

(Mseguro)

Factores ambientales no influenciados por la gestión de riesgos

Velocidad de flujo	18.000 000043
Factor de dilución (Rvo)	10
Factor de dilución (Áreas Costeras)	100

Otras condiciones operacionales dadas que afectan la exposición ambiental

Número de días de emisión al año	300
Factor de emisión o de descarga:	0,00 %
Aire	
Factor de emisión o de descarga:	0,00 %
Agua	
Factor de emisión o de descarga:	0,01 %
Suelo	

Condiciones y medidas relacionadas con la planta municipal de tratamiento de aguas residuales

Tipo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales	Planta municipal de tratamiento de aguas residuales
Velocidad de flujo del efluente en la planta de tratamiento de aguas residuales	2.000 000043
Eficacia (de una medida)	87 %
Tratamiento de Lodos	Lodos residuales no deben ser desechados a la naturaleza.

2.3 Escenario de contribución que controla la exposición de los trabajadores para: PROC15

Características del producto

Forma física (en el momento del uso)	Líquido, volatilidad baja
Temperatura de procesos	< 53 °C

Frecuencia y duración del uso

Frecuencia de uso	8 horas / día
Frecuencia de uso	5 días / semana

Otras condiciones operacionales que afectan a la exposición de los trabajadores

Al exterior / Al Interior	Zona interior con aspiración local (LEV)
---------------------------	--

Condiciones y medidas relacionadas con la protección personal, la higiene y la evaluación de la salud

Utilice guantes resistentes a productos químicos (conforme a EN374) en combinación con controles de supervisión de gestión intensiva. Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro

Consejos adicionales para las buenas prácticas más allá de la Evaluación de Seguridad Química REACH

Asesoramiento adicional sobre buenas prácticas	Utilice indumentaria adecuada para evitar la exposición de la piel.
--	---

3. Estimación de la exposición y referencia a su fuente

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD – Anexo
de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Artículo número 800849
Denominación Etanolamina para síntesis

Medio Ambiente

CS	Descriptor de uso	Mseguro	Compartimento	RCR	Método de Evaluación de la exposición
2.1	ERC2, SpERC AISE 2	61639 kg / dva	Agua dulce	< 1	ECETOC TRA, modificado
2.2	ERC6a	73899 kg / dva	Agua dulce	< 1	ECETOC TRA 2

Trabajadores

CS	Descriptor de uso	Duración de la exposición, ruta, efecto	RCR	Método de Evaluación de la exposición
2.3	PROC15	larga duración, inhalativo, sistémico	0,23	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, dermal, sistémico	0,01	ECETOC TRA, modificado
		larga duración, combinado, sistémico	0,24	

No se ha usado un factor de reducción de ventilación de escape local (VE L) para calcular las estimaciones de la exposición diurna.

4. Orientación al Usuario Intermedio para evaluar si trabaja dentro de los límites fijados por el Escenario de Exposición

Consulte los documentos siguientes: ECHA Guidance on information requirements and chemical safety assessment Chapter R.12: Use descriptor system; ECHA Guidance for downstream users; ECHA Guidance on information requirements and chemical safety assessment Part D: Exposure Scenario Building, Part E: Risk Characterisation and Part G: Extending the SDS; VCI/Cefic REACH Practical Guides on Exposure Assessment and Communications in the Supply Chain; CEFIC Guidance Specific Environmental Release Categories (SPERCs).

Para escalar la evaluación de la exposición laboral conducida con ECETOC TRA consulte la herramienta de Merck SciDeEx® bajo www.merckmillipore.com/scideex.



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Página: 1 / 6

Versión: 1

Fecha de Emisión: 10/02/2011

Fecha de Revisión: 17/10/2013

Número de FDS:

078A

METANO

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1. Identificador del producto

Nombre comercial : METANO
Descripción Química : Metano N° CAS :74-82-8 N° EC :200-812-7 N° índice :601-001-00-4
Número de registro : Figura en la lista del Anexo IV / V de REACH, exento de solicitud de registro.
Fórmula química : CH₄

1.2. Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos aplicables identificados : Industrial y profesional. Llevar a cabo evaluación de riesgo antes de usar.
Gas de ensayo / gas de calibrado.
Uso en laboratorio.
Reacción Química (Síntesis)
Usar como un combustible.
Usar para la fabricación de componentes electrónicos/fotovoltaicos.
Para mayor información sobre su uso contactar al suministrador.

1.3. Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Identificación de la Compañía : PRAXAIR Cópia de Trabajo. No valida. Uso Interno

1.4. Teléfono de emergencia

Identificación de la Compañía : PRAXAIR ESPAÑA, S.L.U.
Orense, 11 - 5ª Planta
28020 Madrid
: contact_espana@praxair.com

Dirección email (persona competente)

Teléfono (persona competente) : (+34)914533000

Teléfono de emergencia en : (+34)915974453

Transporte Líquido (24 h)

Teléfono de emergencia en : (+34)902213000

Instalaciones (24 h)

Teléfono de emergencia en Gases : (+34)917863432

Especiales (24 h)

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

2.1. Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clase y categoría de riesgo, :
Código de Normativa CE
1272/2008 (CLP)

• **Peligros físicos** : Gases inflamables - Categoría 1 - Peligro - (CLP : Flam. Gas 1) - H220
Gases a presión - Gases comprimidos - Atención - (CLP : Press. Gas) - H280

Clasificación 67/548 CE o 1999/45 :
CE

Clasificación 67/548 CE o 1999/45 : F+; R12
CE

2.2. Elementos de la etiqueta

Normativa de Etiquetado CE :
1272/2008 (CLP)

• **Pictogramas de peligro :**



GHS02



GHS04

• **Palabra de advertencia** : Peligro

• **Indicación de peligro** : H220 : Gas extremadamente inflamable.
H280 : Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.

• **Consejos de prudencia** :

- **Prevención** :

- **Respuesta** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

- **Almacenamiento** :

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes

3.1. Sustancia / Mezcla

Nombre del componente : Sustancia.

Contenido : Metano

N° CAS : 100 %

N° EC : 74-82-8

N° Índice : 200-812-7

Clasificación : 601-001-00-4

Nota : F+; R12 ----- Flam. Gas 1 (H220) Press. Gas Compressed (H280)

Nota : : :



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Página: 2 / 6

Versión: 1

Fecha de Emisión: 10/02/2011

Fecha de Revisión: 17/10/2013

Número de FDS:

078A

METANO

SECCIÓN 4: Primeros auxilios

4.1. Descripción de los primeros auxilios

- **Inhalación** : Retirar a la víctima a un área no contaminada llevando colocado el equipo de respiración autónoma. Mantener a la víctima caliente y en reposo. Llamar al doctor. Aplicar la respiración artificial si se para la respiración.
- **Contacto con la piel** : No se esperan efectos adversos de este producto.
- **Contacto con los ojos** : No se esperan efectos adversos de este producto.
- **Ingestión** : La ingestión no está considerada como una vía potencial de exposición.

4.2. Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

- **Principales síntomas y efectos, agudos y retardados** : A elevadas concentraciones puede causar asfixia. Los síntomas pueden incluir la pérdida de la consciencia o de la movilidad. La víctima puede no haberse dado cuenta de la asfixia.
A bajas concentraciones puede tener efectos narcotizantes. Los síntomas pueden incluir vértigos, dolor de cabeza, náuseas y pérdida de coordinación.

4.3. Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

- **Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente** : Ninguno.

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

5.1. Medios de extinción

- **Medios de extinción adecuados** : Agua en spray o en nebulizador.
Polvo seco.
- **Medios de extinción inadecuados** : No usar agua a presión para extinguirlo.
Dióxido de carbono.

5.2. Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

- **Peligros específicos** : La exposición al fuego puede causar la rotura o explosión de los recipientes.
- **Productos de combustión peligrosos** : La combustión incompleta puede formar monóxido de carbono.

5.3. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

- **Métodos específicos** : Si es posible detener la fuga de producto.
Utilizar medidas de control de incendios apropiadas con el incendio circundante. La exposición de los envases de gas al fuego y al calor puede provocar su ruptura. Enfriar los envases dañados con chorro de agua pulverizada desde una posición protegida. No vaciar el agua contaminada por el fuego en los desagües.
No extinguir una fuga de gas inflamada si no es absolutamente necesario. Se puede producir la reignición espontánea explosiva. Extinguir los otros fuegos.
Usar agua en spray o en nebulizador para disipar humos de incendios.
- **Equipo de protección especial para extinción de incendios** : En espacios confinados utilizar equipos de respiración autónoma de presión positiva.
Vestimenta y equipo de protección standard (aparato de respiración autónoma) para bomberos.
Standard EN 137-máscara de cara completa que incluya un aparato de respiración autónoma de aire comprimido en circuito abierto.
EN 469: Vestimenta protectora para bomberos. EN 659: Guantes de protección para bomberos.

SECCIÓN 6: Medidas en caso de vertido accidental

6.1. Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

- **Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia** : Téngase en cuenta el riesgo de atmósferas explosivas.
Intentar parar el escape/derrame.
Utilizar equipos de respiración autónoma cuando entren en el área a menos que esté probado que la atmósfera es segura.
Evacuar el área.
Asegurar la adecuada ventilación de aire.
Eliminar las fuentes de ignición.

6.2. Precauciones relativas al medio ambiente

- **Precauciones relativas al medio ambiente** : Intentar parar el escape/derrame.

6.3. Métodos y material de contención y de limpieza

- **Métodos y material de contención y de limpieza** : Ventilar la zona.

6.4. Referencia a otras secciones

- **Referencia a otras secciones** : Ver también las Secciones 8 y 13.



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Página: 3 / 6

Versión: 1

Fecha de Emisión: 10/02/2011

Fecha de Revisión: 17/10/2013

Número de FDS:

078A

METANO

SECCIÓN 7: Manipulación y almacenamiento

7.1. Precauciones para una manipulación segura

Uso seguro del producto

- : Solo personas experimentadas y debidamente entrenadas deben manejar gases sometidos a presión. La sustancia debe ser manipulada de acuerdo con los procedimientos de buena higiene industrial y seguridad. Utilizar solo equipo específicamente apropiado para este producto y para su presión y temperatura de suministro, en caso de duda contacte con su suministrador.
- Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.
- Purgar el aire del sistema antes de introducir el gas.
- Mantener lejos de fuentes de ignición, incluyendo descarga estática.
- No fumar cuando se manipule el producto.
- Tener en cuenta el riesgo de una posible atmosfera susceptible de explotar y la necesidad de disponer de un equipo que pruebe la explosión.
- Considerar el uso de herramientas que no emitan chispas.
- Comprobar que el conjunto del sistema de gas ha sido, o es con regularidad, revisado antes de usarse respecto a la posibilidad de escapes.
- Considerar los instrumentos de reducción de la presión en las instalaciones de gas..
- : Solicitar del suministrador las instrucciones de manipulación de los contenedores.
- Debe prevenirse la filtración de agua al interior del recipiente.
- No permitir el retroceso hacia el interior del recipiente.
- Proteger las botellas de los daños materiales, no arrastrar, ni rodar, deslizar ó dejar caer.
- Si mueve botellas, incluso en pequeños recorridos, use una carretilla (mecanica, manual,etc) diseñada para transportar botellas.
- Mantener colocada la caperuza de la valvula hasta que el envase quede fijo contra una pared, un banco ó situado en una plataforma , y ya dispuesto para su uso.
- Si el usuario aprecia cualquier problema en una valvula de una botella en uso, termine su utilización y contacte al suministrador.
- Nunca intentar reparar ó modificar las valvulas de los depositos ó los mecanismos de seguridad.
- Las valvulas que estan dañadas deben ser inmediatamente comunicadas al suministrador.
- Mantener los accesorios de la valvula del deposito libre de contaminantes, especialmente aceites y agua.
- Reponer la caperuza de la valvula ó del depósito si se facilitan por el suministrador , siempre que el envase quede desconectado del equipo.
- Cierre la valvula del del deposito despues de su uso y cuando quede vacio, incluso si aún esta conectado al equipo.
- No intentar nunca trasvasar gases de una botella/envase a otro.
- No utilizar nunca mecanismos con llamas ó de calentamiento electrico para elevar la presión del deposito.
- No quitar ni desfigurar las etiquetas facilitadas por el suministrador para identificar el contenido de las botellas .

Manipulación segura del envase del gas

7.2. Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

- : Observar todas las regulaciones y los requerimientos locales relativos al almacenamiento de contenedores.
- Mantener el contenedor por debajo de 50°C, en un lugar bien ventilado.
- Separa de los gases oxidantes o de otros materiales oxidantes durante el almacenamiento.
- Los contenedores ser almacenados en posición vertical y debidamente asegurados para evitar su caída.
- Los contenedores almacenados deben ser comprobados periodicamente respecto a su estado general y a posibles fugas .
- Las protecciones de las valvulas y las caperuzas deben estar colocadas .
- Almacenar los contenedores en un lugar libre del riesgo y lejos de fuentes de calor e ignición.
- Todos los equipos electricos en las areas de almacenamiento deben ser compatibles con el riesgo de una posible atmosfera explosiva.
- Los contenedores no deben ser almacenados en condiciones que favorezcan la corrosión .
- Mantener alejado de materiales combustibles.

7.3. Usos específicos finales

Usos específicos finales

: Ninguno.

SECCIÓN 8: Controles de exposición/protección individual

8.1. Parámetros de control

8.2. Controles de la exposición

Controles técnicos apropiados

- : Los sistemas sujetos a presión deben ser regularmente comprobados respecto a fugas.
- Detectores de gases deben de ser usados siempre que gases/vapores inflamables pueden ser emitidos.
- Proporcionar ventilación adecuada, general y local, a los gases de escape.
- Considerar un sistema de permisos de trabajo p.ej para trabajos de mantenimiento.
- Esta sustancia no esta clasificada como peligrosa para la salud humana o por sus efectos al medioambiente, tampoco es un PBT ni un vPvB, de modo que no se necesita un analisis de riesgos ni la caracterizacion de estos. Para tareas en la que se requiera la intervención de trabajadores, la sustancia debe ser manipulada de acuerdo con los procedimientos de buena higiene industrial y seguridad.
- : Un analisis de riesgos debe ser realizado y formalizado en cada area de trabajo para evaluar los riesgos relacionados con el uso del producto y para determinar el PPE que provoca un riesgo relevante. Estas recomendaciones deben ser tenidas en cuenta.
- PPE que cumplan los estandares recomendados por EN/ISO deben seleccionarse.
- : usar gafas con de seguridad con protecciones laterales.
- Standard EN 166- Proteccion para el ojo.

Equipo de protección personal

• Protección para el ojo/cara

• Protección para la piel



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Página: 4 / 6

Versión: 1

Fecha de Emisión: 10/02/2011

Fecha de Revisión: 17/10/2013

Número de FDS:

078A

METANO

- **Protección de las manos**
 - : Usar guantes de trabajo al manejar envases de gases.
 - Standard EN 388- guantes que protegen contra riesgos mecanicos.
- **Otras**
 - : Usar zapatos de seguridad mientras se manejan envases.
 - Standard EN ISO 20345 - Equipos de protección personal-zapatos de seguridad.
 - Considerar el uso de prendas de seguridad resistentes a llama antiestatica.
 - Estándar EN ISO 14116- Materiales que limitan la difusión de llamas.
- **Protección de las vías respiratorias**
 - : Los filtros de gas pueden usarse si todas las condiciones existentes, tales como tipo , concentración del/los contaminante/s y tiempo de uso son todas conocidas. .
 - Filtro recomendado AX (marron).
 - Para la selección del equipo adecuado consultar la información de producto elaborada por el fabricante del equipo de respiración.
 - Standard EN 14387-filtros de gas(es),filtro(s) combinado(s) y mascarar que cubran toda la cara-EN 136.
 - Los filtros de gas no protegen contra la insuficiencia de oxigeno.
- **Peligros térmicos**
 - : No necesaria.
- Controles de exposición medioambiental**
 - : Tener en cuenta las regulaciones locales relativas a las restricciones de emisiones a la atmosfera. Ver sección 13 para metodos especificos de tratamiento de residuos de gases.

SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

9.1. Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

- Apariencia**
 - : Gas.
- Estado físico a 20°C / 101.3kPa**
 - : Gas.
- Color**
 - : Incoloro.
- Olor**
 - : Inoloro.
- Valor de pH**
 - : No aplica.
- Masa molecular [g/mol]**
 - : 16
- Punto de fusión [°C]**
 - : -182
- Punto de ebullición [°C]**
 - : -161
- Temperatura crítica [°C]**
 - : -82
- Punto de inflamación [°C]**
 - : No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.
- Velocidad de evaporación (éter=1)**
 - : No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.
- Rango de inflamabilidad [% de volumen en aire]**
 - : 4.4 - 17
- Presión de vapor [20°C]**
 - : No aplica.
- Densidad relativa del gas (aire=1)**
 - : 0.6
- Densidad relativa del líquido (agua=1)**
 - : 0.42
- Solubilidad en agua [mg/l]**
 - : 26
- Coefficiente de reparto n-octanol/agua [log Kow]**
 - : 1.09
- Temperatura de auto-inflamación [°C]**
 - : 595
- Viscosidad a 20°C [mPa.s]**
 - : No aplica.
- Propiedades explosivas**
 - : No aplica.
- Propiedades comburentes**
 - : Ninguno.
- Información adicional**
 - :
- Otros datos**
 - : Ninguno.

SECCIÓN 10: Estabilidad y reactividad

10.1. Reactividad

- Reactividad**
 - : Sin riesgo de reactividad salvo lo expresado en la sub-seccion mas adelante.

10.2. Estabilidad química

- Estabilidad química**
 - : Estable en condiciones normales.

10.3. Posibilidad de reacciones peligrosas

- Posibilidad de reacciones peligrosas**
 - : Puede reaccionar violentamente con materias oxidantes.
 - Puede formar mezclas explosivas con el aire.

10.4. Condiciones que deben evitarse

- Condiciones que deben evitarse**
 - : Manténgase alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. – No fumar.

10.5. Materiales incompatibles

- Materiales incompatibles**
 - : Aire, Oxidante.
 - Para información complementaria sobre su compatibilidad referirse a la ISO 11114.

10.6. Productos de descomposición peligrosos

- Productos de descomposición peligrosos**
 - : Productos con riesgo de descomposición no se deben producir por en condiciones normales de almacenamiento y uso.

SECCIÓN 11: Información toxicológica

11.1. Información sobre los efectos toxicológicos

- Toxicidad aguda**
 - : No se conocen los efectos toxicológicos de este producto.
- Corrosión o irritación cutáneas**
 - : Se desconocen los efectos de este producto.



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Página: 5 / 6

Versión: 1

Fecha de Emisión: 10/02/2011

Fecha de Revisión: 17/10/2013

Número de FDS:

078A

METANO

Lesiones o irritación ocular graves	: Se desconocen los efectos de este producto.
Sensibilización respiratoria o cutánea	: Se desconocen los efectos de este producto.
Carcinogénesis	: Se desconocen los efectos de este producto.
Mutagenicidad	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad para la reproducción	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición única	: Se desconocen los efectos de este producto.
Toxicidad específica en determinados órganos (STOT) – exposición repetida	: Se desconocen los efectos de este producto.
Peligro de aspiración	: No es aplicable a gases ni a mezcla de gases.


SECCIÓN 12: Información ecológica

12.1. Toxicidad	
EC50 48 Horas - Daphnia magna [mg/l]	: 69.4
EC50 72h Algae [mg/l]	: 19.4
LC50-96 Horas en pez [mg/l]	: 147.5
12.2. Persistencia y degradabilidad	
Persistencia y degradabilidad	: La sustancia es biodegradable. Es difícil que perviva.
12.3. Potencial de bioacumulación	
Potencial de bioacumulación	: No es susceptible de bioacumulación debido a un bajo log Kow (log Kow <4) Referirlo a la sección 9.
12.4. Movilidad en el suelo	
Movilidad en el suelo	: Debido a su alta volatilidad el producto es difícil que cause polución al suelo o al agua.
12.5. Resultados de la valoración PBT y mPmB	
Resultados de la valoración PBT y mPmB	: No se clasifica como PBT o vPvB.
12.6. Otros efectos adversos	
Otros efectos adversos	:
Efectos sobre la capa de ozono	: Ninguno.
Factor de calentamiento global [CO2=1]	: 25
Produce efectos en el calentamiento global	: Cuando se descarga en grandes cantidades puede contribuir al efecto invernadero.

SECCIÓN 13: Consideraciones relativas a la eliminación

13.1. Métodos para el tratamiento de residuos	
Métodos para el tratamiento de residuos	: Evitar la descarga en la atmósfera. No descargar en áreas donde hay riesgo de que se forme una mezcla explosiva con el aire. El gas residual debe ser quemado a través de un quemador adecuado que disponga de antirretroceso de llama. No descargar dentro de ningún lugar donde su acumulación pudiera ser peligrosa. Referirse al código de prácticas de EIGA Doc 30/10 Eliminación de gases accesible en http://www.eiga.org para mayor información sobre métodos adecuados de vertidos. Asegurarse de no superar los límites de emisión establecidos en regulaciones locales.
Lista de residuos peligrosos	: 16 05 04: Contenedores de gases a presión (incluido halones) que contienen sustancias peligrosas.
13.2. Información complementaria	
Información complementaria	: Ninguno.

SECCIÓN 14: Información relativa al transporte

14.1. Número ONU	
Número ONU	: 1971
14.2. Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	
Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas	: METANO COMPRIMIDO
14.3. Clase(s) de peligro para el transporte	
Clase(s) de peligro para el transporte	:  2.1 : Gases inflamables
14.4. Grupo de embalaje	
Código de clasificación	: 1 F
14.5. Peligros de contaminación	
Peligros para el medio ambiente	: Ninguno.
IMDG-Marine pollutant	: No



FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Página: 6 / 6

Versión: 1

Fecha de Emisión: 10/02/2011

Fecha de Revisión: 17/10/2013

Número de FDS:

078A

METANO

14.6 Precauciones particulares para los usuarios

Precauciones particulares para los usuarios : Evitar el transporte en los vehículos donde el espacio de la carga no esté separado del compartimiento del conductor. Asegurar que el conductor está enterado de los riesgos potenciales de la carga y que conoce que hacer en caso de un accidente o de una emergencia. Antes de transportar las botellas :
- Asegurar una ventilación adecuada.
- Asegúrese de que los recipientes están bien fijados.
- Asegurarse que las válvulas de las botellas están cerradas y no fugan.
- Asegurarse que el tapón del acoplamiento de la válvula (cuando exista) está adecuadamente apretado.
- Asegurarse que la caperuza de la válvula o la tulipa, (cuando exista), está adecuadamente apretada.

14.7. Transporte de granel según anexo II del tratado MARPOL 73/78 y según código IBC

Transporte de granel según anexo II del tratado MARPOL 73/78 y según código IBC : No aplica.

SECCIÓN 15: Información reglamentaria

15.1. Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

Legislación UE :
Restricciones : Ninguno.
Seveso directiva 96/82/EC : Figura en la lista.
Legislación Nacional :
Legislación Nacional : Asegúrese que se cumplen las normativas nacionales y locales.

15.2. Evaluación de la seguridad química

Evaluación de la seguridad química : Un CSA (Análisis de seguridad química) ha sido desarrollado. Ver la Sección 8.2.

SECCIÓN 16: Otra información

Enumeración de los cambios : Hoja de datos de seguridad revisada de acuerdo con la regulación de la Comisión (UE) N°453/2010.
Consejos relativos a la formación : Asegurarse que los operarios conocen el riesgo de inflamabilidad. El riesgo de asfixia es a menudo despreciado y debe ser recalado durante la formación de los operarios.

Etiquetado 67/548 CE o 1999/45 CE :

• Símbolo(s) :



• Frase(s) R : F+ : Extremadamente inflamable.
• Frase(s) S : R12 : Extremadamente inflamable.
S9 : Consérvese el recipiente en lugar bien ventilado. S16 : Conservar alejado de toda llama o fuente de chispas - No fumar. S33 : Evítase la acumulación de cargas electrostáticas.
R12 : Extremadamente inflamable.

Lista del texto completo de Frases-R en la sección 3

Información adicional : La presente Ficha de Datos de Seguridad está establecida de acuerdo con las Directivas Europeas en vigor .
RENUNCIA DE RESPONSABILIDAD : A pesar de que durante la preparación de este documento se ha tomado especial cuidado, no se acepta ninguna responsabilidad por las lesiones o los daños resultantes.

Los detalles dados son ciertos y correctos en el momento de llevarse este documento a impresión. Antes de utilizar el producto en un nuevo proceso o experimento, debe llevarse a cabo un estudio completo de seguridad y de compatibilidad de los materiales.

Responsabilidades

: Estas instrucciones han sido elaboradas por Praxair sobre la base de las informaciones disponibles a la fecha de las mismas y cubren las aplicaciones más habituales, sin garantizar que su contenido sea suficiente en todos los casos y situaciones. No se acepta ninguna responsabilidad por las lesiones o daños resultantes de su utilización. Su observancia no excluye el cumplimiento de la normativa vigente en cada momento.

Descripción de cambios

: Adaptación a la normativa vigente.

Fin del documento

Planta de Producción de Hidrógeno por
Reformado de Gas Natural

DOCUMENTO II.

PLANOS

Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

Universidade de Santiago de Compostela

Escola Técnica Superior de Enxeñaría

Julio 2016

Alejandro Ferraces Azcunaga | Óscar López Gestoso



Situación en España



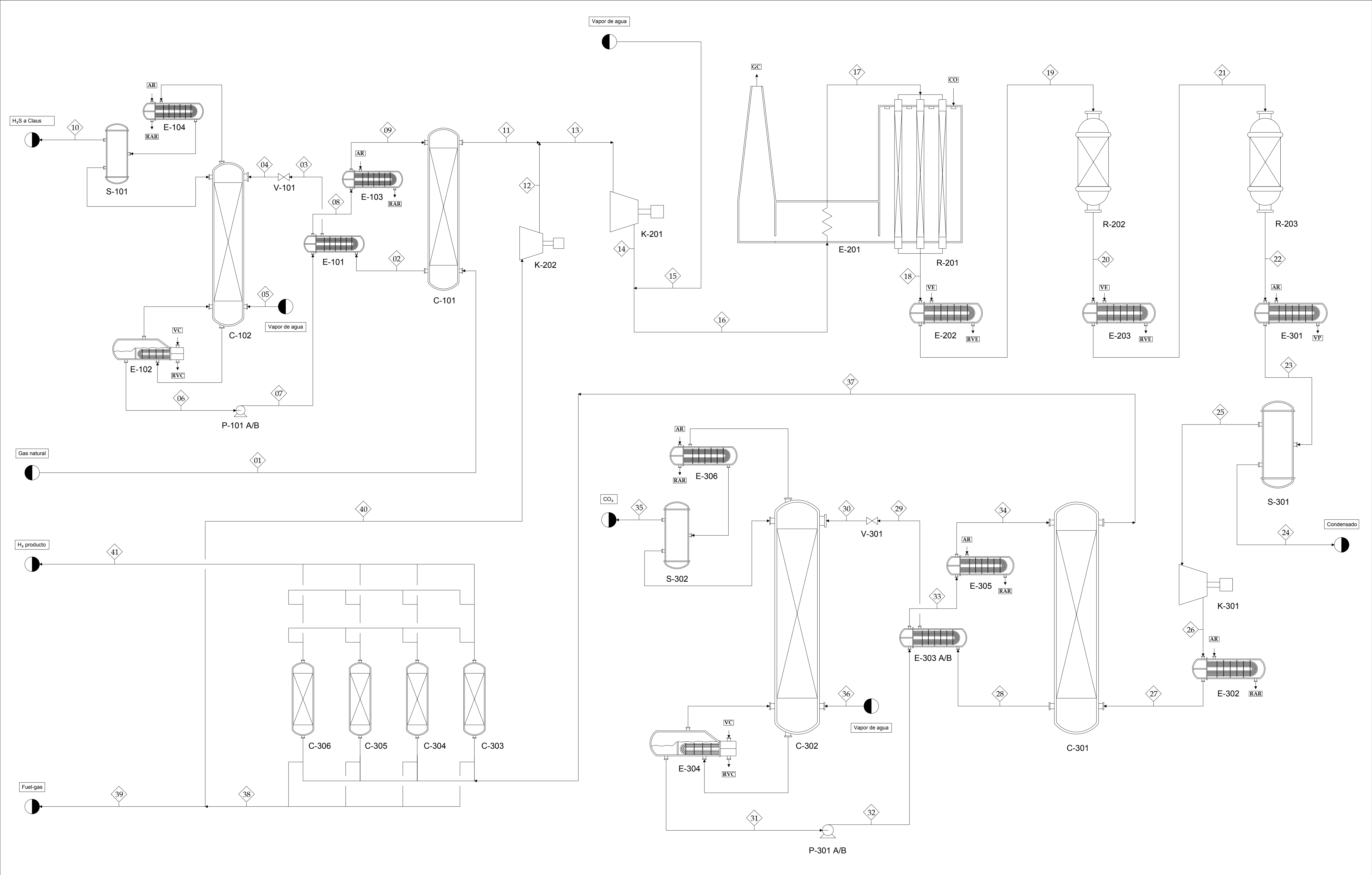
Situación en Galicia

Polígono de A Sionlla



Parcelario del polígono industrial de A Sionlla

Universidade de Santiago de Compostela E.T.S.E.: Escola Técnica Superior de Ingeniería			
Fecha: Mayo 2016	Planta de Producción de Hidrógeno por Reformado de Gas Natural		
Autores: Alejandro Ferraces Azcunaga Óscar López Gestoso	Plano: Emplazamiento		
Firma:	Escala: S/E	Revisión:	Plano nº: P-01



SECCIÓN 100	
C-101	Columna de absorción
E-101	Intercambiador de calor
V-101	Válvula de estrangulamiento
C-102	Columna de desorción
E-102	Intercambiador de calor
P-101 A/B	Bomba
E-103	Intercambiador de calor
E-104	Intercambiador de calor
S-101	Separador de condensados
SECCIÓN 200	
K-201	Compresor
E-201	Sec. convección (reformador)
R-201	Reactor (reformador)
E-202	Intercambiador de calor
R-202	Reactor (HTS)
E-203	Intercambiador de calor
R-203	Reactor (LTS)
K-202	Compresor
SECCIÓN 300	
E-301	Intercambiador de calor
S-301	Separador de condensados
K-301	Compresor
E-302	Intercambiador de calor
C-301	Columna de absorción
E-303 A/B	Intercambiador de calor
V-301	Válvula de estrangulamiento
C-302	Columna de desorción
E-304	Intercambiador de calor
P-301 A/B	Bomba
E-305	Intercambiador de calor
E-306	Intercambiador de calor
S-302	Separador de condensados
C-304	Columna de adsorción
C-305	Columna de adsorción
C-306	Columna de adsorción
C-307	Columna de adsorción

[AR]	Agua de refrigeración	[VE]	Vapor de enfriamiento
[RAR]	Retorno de agua de refrigeración	[RVE]	Retorno de vapor de enfriamiento
[VP]	Vapor producido	[CO]	Combustible
[VC]	Vapor de calefacción	[GC]	Gases de combustión
[RVC]	Retorno de vapor de calefacción		

Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Estado físico	Gas	Líquido	Líquido	Líquido	Vapor	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Vapor	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas	Líquido	Gas	Gas	Gas	Gas	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Líquido	Gas	Vapor	Gas	Gas	Gas	Gas	
Temperatura (°C)	25,0	43,2	101,5	101,5	106,5	106,5	106,5	47,3	25,0	30,0	25,0	40,9	26,0	61,0	250,0	198,9	477,0	880,0	376,5	450,0	179,4	220,0	30,0	30,0	30,0	53,0	30,0	43,4	103,0	103,0	116,6	116,6	59,6	30,0	32,0	116,6	30,0	30,0	30,0	30,0	
Presión (MPa)	1,30	1,30	1,30	0,10	0,12	0,12	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,90	1,90	1,90	1,69	1,69	1,65	1,65	1,60	1,60	1,60	1,60	2,03	2,03	2,03	2,03	0,14	0,16	2,03	2,03	2,03	2,03	0,16	2,02	0,35	0,35	0,35	2,02
Flujo molar (kmol/h)	515,2	27,29	27,29	27,29	0,001	26,38	26,38	26,38	26,38	0,914	514,3	40,85	555,1	555,1	1616,4	2171,6	2171,6	3115,7	3115,7	3115,7	3115,7	3115,7	3115,7	664,1	2451,6	2451,6	2451,6	37875,2	37875,2	37875,2	37423	37423	37423	37423	452,4	0,045	1999,2	299,2	258,4	40,85	1700,0
Flujo másico (kg/h)	8643,6	558,0	558,0	558,0	0,016	524,0	524,0	524,0	524,0	33,99	8609,7	375,7	8985,4	8985,4	29095	38081	38081	38081	38081	38081	38081	38081	38081	11980	26101	26101	26101	768297	768297	768297	748393	748393	748393	748393	19905	0,814	6196,6	2752,4	2376,6	375,7	3444,2
Composición molar (%)																																									
H2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	63,1	4,6	4,6	0,0	1,2	1,2	50,6	50,6	57,2	57,2	60,6	60,6	0,0	77,0	77,0	77,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	94,4	63,1	63,1	63,1	99,9		
N2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,3	1,0	1,0	0,0	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,3	1,3	1,3	0,1		
CO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	0,3	0,3	0,0	0,1	0,1	10,3	10,3	3,7	3,7	0,3	0,3	0,0	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	3,5	3,5	3,5	0,0		
CO2	0,5	1,1	1,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,1	0,5	4,7	0,8	0,8	0,0	0,2	0,2	5,1	5,1	11,6	11,6	15,0	15,0	0,2	19,0	19,0	19,0	1,3	1,3	1,3	0,1	0,1	0,1	0,1	100,0	0,0	0,7	4,7	4,7	4,7	0,0
CH4	94,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,0	20,4	89,5	89,5	0,0	22,9	22,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	0,0	2,5	2,5	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	20,4	20,4	20,4	0,0		
C2+	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	0,0	3,2	3,2	0,0	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
H2O	0,0	92,5	92,5	92,5	100,0	95,7	95,7	95,7	95,7	0,1	0,0	7,1	0,5	0,5	100,0	74,6	74,6	31,9	31,9	25,3	25,3	22,0	22,0	99,8	0,9	0,9	0,9	94,2	94,2	94,2	95,3	95,3	95,3	95,3	0,0	100,0	1,1	7,1	7,1	7,1	0,0
MEA	0,0	4,2	4,2	4,2	0,0	4,3	4,3	4,3	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
H2S	0,1	2,3	2,3	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	67,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Universidad de Santiago de Compostela
E.T.S.E.: Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Fecha:
Mayo 2016

Plant​a de Producción de Hidrógeno
por Reformado de Gas Natural

Autores:
Alejandro Ferraces Azcunaga
Óscar López Gestoso

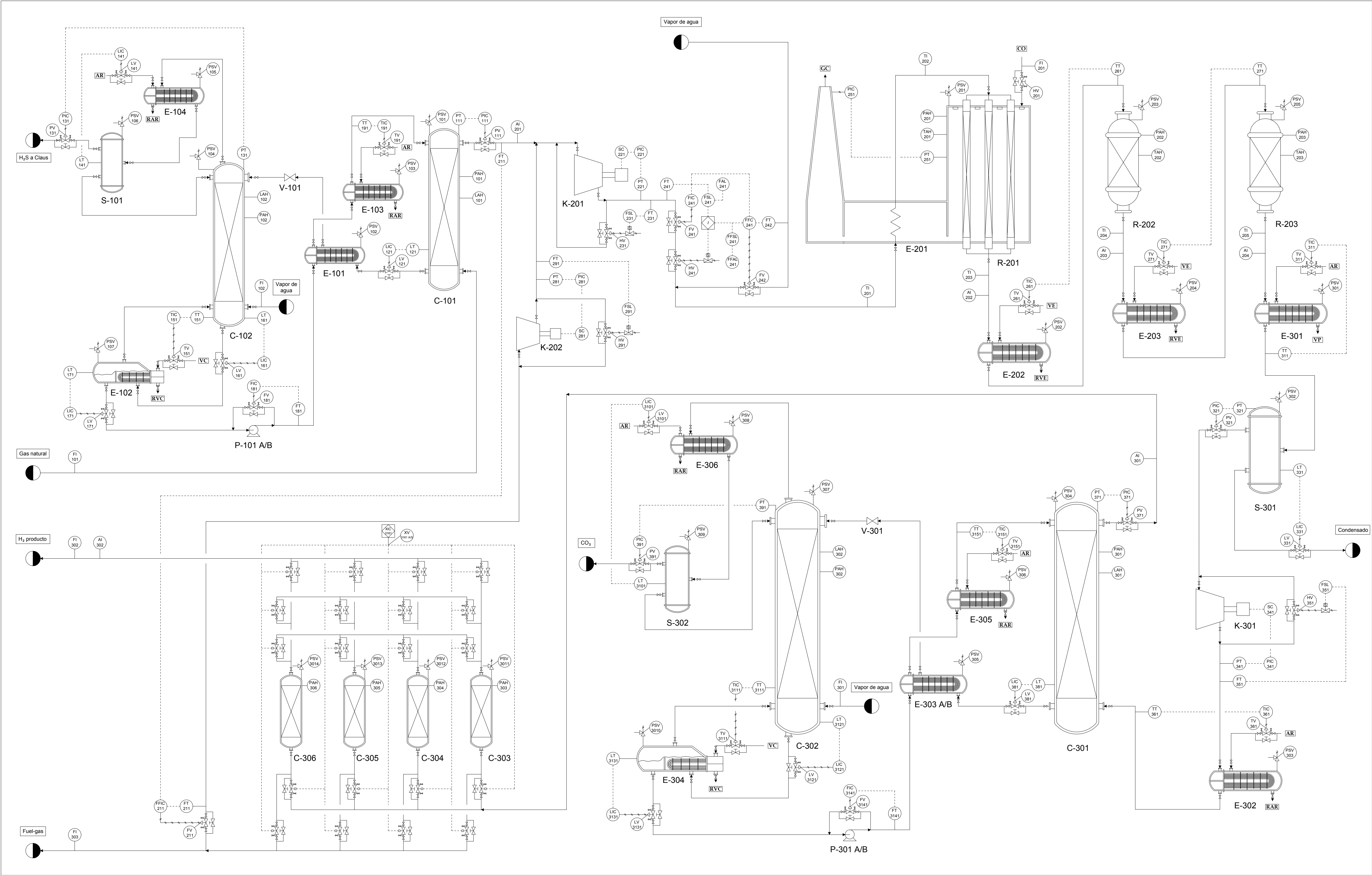
Plano:
Diagrama de flujo

Firma:

Escala:
S/E

Revisión:

Plano n°:
P-02



SECCIÓN 100	
C-101	Columna de absorción
E-101	Intercambiador de calor
V-101	Válvula de estrangulamiento
C-102	Columna de desorción
E-102	Intercambiador de calor
P-101 A/B	Bomba
E-103	Intercambiador de calor
E-104	Intercambiador de calor
S-101	Separador de condensados
SECCIÓN 200	
K-201	Compresor
E-201	Sec. convección (reformador)
R-201	Reactor (reformador)
E-202	Intercambiador de calor
R-202	Reactor (HTS)
E-203	Intercambiador de calor
R-203	Reactor (LTS)
K-202	Compresor
SECCIÓN 300	
E-301	Intercambiador de calor
S-301	Separador de condensados
K-301	Compresor
E-302	Intercambiador de calor
C-301	Columna de absorción
E-303 A/B	Intercambiador de calor
V-301	Válvula de estrangulamiento
C-302	Columna de desorción
E-304	Intercambiador de calor
P-301 A/B	Bomba
E-305	Intercambiador de calor
E-306	Intercambiador de calor
S-302	Separador de condensados
C-304	Columna de adsorción
C-305	Columna de adsorción
C-306	Columna de adsorción
C-307	Columna de adsorción

AR	Agua de refrigeración	VE	Vapor de enfriamiento
RAR	Retorno de agua de refrigeración	RVE	Retorno de vapor de enfriamiento
VP	Vapor producido	CO	Combustible
VC	Vapor de calefacción	GC	Gases de combustión
RVC	Retorno de vapor de calefacción		

NOMENCLATURA PI&D

1ª LETRA:
variable controlada y modificador

A composición
F flujo
L nivel
P presión
S velocidad
T temperatura
X control PSA

F relación
S seguridad

Sección
Número del instrumento
Número del lazo

LETRAS SUCESIVAS:
función del elemento y modificador

A alarma
C controlador
I indicador
S interruptor
T sensor y transmisor
V válvula

H alto
L bajo

— Línea de proceso
--- Señal eléctrica
--- Señal neumática

Instrumento
CLP

Válvula de control automática
Válvula manual
Válvula de todo o nada
Válvula de corte
Válvula de alivio
Válvula de apertura rápida
Solenoid

Universidad de Santiago de Compostela
E.T.S.E.: Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Fecha:
Mayo 2016

Planta de Producción de Hidrógeno
por Reformado de Gas Natural

Autores:
Alejandro Ferraces Azcunaga
Óscar López Gestoso

Plano:
Diagrama P&I

Firma:

Escala:
S/E

Revisión:

Plano n°:
P-03

Planta de Producción de Hidrógeno por
Reformado de Gas Natural

DOCUMENTO III. ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA

Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

Universidade de Santiago de Compostela

Escola Técnica Superior de Enxeñaría

Julio 2016

Alejandro Ferraces Azcunaga | Óscar López Gestoso

INDICE

1. ESTUDIO BÁSICO DE SEGURIDAD Y SALUD	6
1.1 Objeto	6
1.2 Datos generales de la obra	7
1.3 Análisis de riesgos y medidas de protección por las características del emplazamiento.....	8
1.3.1 Accesos.....	8
1.3.2 Propiedades colindantes.....	8
1.3.3 Conducciones de agua	9
1.3.4 Líneas eléctricas enterradas	9
1.4 Análisis de riesgos profesionales durante la ejecución de la obra	10
1.4.1 Acondicionamiento del terreno	10
1.4.2 Cimentación y estructuras.....	10
1.4.3 Cubiertas y materiales ligeros	11
1.4.4 Cierres.....	11
1.4.5 Instalaciones auxiliares.....	12
1.4.6 Acabados	12
1.5 Equipos de protección colectiva a utilizar en la obra	12
1.5.1 Acondicionamiento del terreno	13
1.5.2 Cimentación y estructuras.....	13
1.5.3 Cubiertas y materiales ligeros	13
1.5.4 Cierres.....	14
1.5.5 Instalaciones auxiliares.....	14
1.5.6 Acabados	14
1.6 Equipos de protección individual	14

1.6.1	Protectores de ojos y cara	15
1.6.2	Protección de pies y piernas.....	16
1.6.3	Protección de la cabeza.....	16
1.6.4	Protección de los oídos	16
1.6.5	Ropa protectora	17
1.7	Señalización	17
1.8	Trabajos posteriores.....	18
1.9	Obligaciones de los distintos agentes que actúan en la obra	18
1.9.1	Obligaciones del promotor.....	18
1.9.2	Obligaciones del coordinador en materia de seguridad y salud	18
1.9.3	Obligaciones del contratista y subcontratista.....	19
1.9.4	Obligaciones de los trabajadores autónomos	19
1.10	Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo	20
1.11	Libro de incidencias.....	20
1.12	Paralización de los trabajos	21
1.13	Derechos de los trabajadores.....	21
2.	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL	22
2.1	Descripción general del proyecto	22
2.2	Análisis de alternativas viables	23
2.2.1	Justificación del emplazamiento	23
2.2.2	Justificación de la tecnología	24
2.3	Descripción y valoración del inventario ambiental	27
2.3.1	Clima	27
2.3.2	Calidad del aire	28

2.3.3	Hidrología y geología	29
2.3.4	Flora y fauna	31
2.3.5	Paisaje.....	32
2.3.6	Ruido	32
2.3.7	Medio socio-económico.....	34
2.3.7.1	Sistema territorial.....	34
2.3.7.2	Análisis demográfico	35
2.3.7.3	Sistema económico	36
2.3.7.4	Sistema socio-cultural	38
2.4	Identificación y valoración de impactos	38
2.4.1	Matriz de incidencia	39
2.4.2	Clima	41
2.4.3	Calidad del aire y emisiones gaseosas	41
2.4.3.1	Dióxido de carbono.....	44
2.4.3.2	Monóxido de carbono	44
2.4.3.3	Óxidos de nitrógeno	45
2.4.3.4	Óxidos de azufre	45
2.4.3.5	Partículas	46
2.4.3.6	Hidrocarburos volátiles	46
2.4.4	Calidad de las aguas y emisiones líquidas	47
2.4.5	Calidad del suelo y emisiones sólidas	48
2.4.6	Flora y fauna	49
2.4.7	Paisaje.....	50
2.4.8	Ruido	50
2.4.9	Medio socio-económico.....	50
2.5	Medidas para la minimización del impacto.....	51

2.6 Programa de Vigilancia Ambiental	53
2.7 Resumen del proyecto y conclusiones	55
3. BIBLIOGRAFÍA	57

1. ESTUDIO BÁSICO DE SEGURIDAD Y SALUD

En este documento se incluye el Estudio Básico de Seguridad y Salud, un estudio únicamente descriptivo que sirve para la posterior elaboración del Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo.

1.1 Objeto

Tiene como objeto establecer las disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción respecto a la prevención de riesgos de accidentes laborales, de enfermedades profesionales y de daños mediante la descripción de la organización, procedimientos y medios de seguridad a emplear en los trabajos.

Mediante este Estudio Básico de Seguridad y Salud, se cumple lo estipulado en el artículo 16 de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales, referente a la obligación de planificar la acción preventiva a partir de una evaluación de los riesgos en el tema de seguridad y salud de los trabajadores:

“La acción preventiva en la empresa se planificará por el empresario a partir de una evaluación inicial de los riesgos para la seguridad y la salud de los trabajadores. [...] La evaluación será actualizada cuando cambien las condiciones de trabajo y, en todo caso, se someterá a consideración y se revisará, si fuese necesario, con ocasión de los daños para la salud que se hayan producido.”

Dado que, como se recoge en el artículo 14 de la presente Ley:

“Los trabajadores tienen derecho a una protección eficaz en materia de seguridad y salud en el trabajo”

Además, el Estudio Básico de Seguridad y Salud servirá como directriz básica a la Empresa Constructora para llevar a cabo las obligaciones en el campo de la prevención de riesgos profesionales, facilitando su desarrollo bajo el control de la directiva facultativa, de acuerdo con el Real Decreto 1627/1997, de 24 de octubre, por el que se implanta la obligatoriedad de la inclusión de un estudio de Seguridad y Salud en los proyectos de construcción e ingeniería civil, estableciendo los contenidos mínimos de los que debe constar este estudio, en el marco de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales y transponiendo la Directiva 95/57/CEE del Consejo, de 24 de junio de 1992. [1]

Por otra parte, para la fase de operación de la planta (una vez construida) se lleva a cabo el estudio de seguridad para el análisis de los riesgos derivados del proceso e inherentes a los productos químicos y materiales manejados en la instalación. Este estudio se muestra en la Memoria del presente trabajo, incluyendo un estudio básico de reactividad, una identificación simple de escenarios de incidentes y un índice DOW de incendio y explosión, entre otros aspectos.

1.2 Datos generales de la obra

La obra consiste en la construcción de una *Planta de producción de hidrógeno por reformado de gas natural* con vapor de agua.

La construcción tendrá lugar en los terrenos adquiridos a tal efecto en el parque industrial de A Sionlla, en la provincia de A Coruña, en la parcela de uso industrial número D4b01a, de 44932 m², cuyas características se detallan en la Memoria, en el punto correspondiente al emplazamiento.

Las fases de construcción de la obra son las siguientes:

- Reconocimiento de las obras por el Contratista, acompañado de la Propiedad o de la Dirección Técnica de Obra.
- Organización previa de los trabajos.
- Licencias de ocupación de la calzada y otros permisos.
- Organización de la zona de obra (acondicionamiento del terreno, movimientos de tierra, excavación de zanjas, colocación de prefabricados...)
- Desarrollo de los trabajos:
 - Cimentación.
 - Estructuras (de hormigón y mixtas)
 - Cierres.
 - Cubiertas.
 - Colocación de anclajes y depósitos.
 - Montaje de equipos de planta y tuberías.
 - Soldaduras.
 - Comprobación de las soldaduras por radiografiado.
 - Instalación de la instrumentación, válvulas, accesorios y equipos de medida o control.

- Instalaciones auxiliares (fontanería, eléctricas, de gas, calefacción, pararrayos, toma de tierra...)
- Acabados (pintura, carpintería, vidriería...)

Antes del comienzo de las obras es necesario conocer todos los servicios afectados (agua, gas, electricidad, teléfono y alcantarillado) para prevenir cualquier eventualidad. [2]

1.3 Análisis de riesgos y medidas de protección por las características del emplazamiento

Estas características condicionan diversas circunstancias que pueden decidir sobre la seguridad, salud y bienestar de los trabajadores mientras dure la construcción de la planta. Fundamentalmente, será necesario estudiar los accesos a la obra, las características de las propiedades colindantes, las conducciones de agua y las líneas eléctricas enterradas que puedan estar ya instaladas en el emplazamiento de la obra.

1.3.1 Accesos

Se señalizarán adecuadamente la entrada o entradas a la obra, o se tomará cualquier otra medida precisa para evitar riesgos de accidentes motivados por las características de estos accesos.

Por otra parte, es necesario evitar interferencias en los trabajos por parte de personal ajeno a la obra. Para ello se proponen las siguientes medidas de protección:

- Se acotarán los accesos a la obra. Se colocarán carteles prohibiendo la entrada a personas ajenas a la obra.
- Se vallarán y señalizarán las excavaciones próximas a lugares de tránsito externo a la obra.

1.3.2 Propiedades colindantes

Se pueden generar riesgos por interferencia con la obra si se desconoce el terreno circundante. Por lo tanto, es fundamental el conocimiento de las características de las propiedades inmediatas a la obra, se delimitación, su uso, extensión, etc., así como las

servidumbres, de haberlas, que puedan suponer riesgos de origen variado y que definirán las medidas de prevención adecuadas en cada caso.

Realizado el reconocimiento de las propiedades colindantes, no se prevén inicialmente riesgos por esta causa, dado que las parcelas colindantes a la seleccionada para la construcción de la *Planta de producción de hidrógeno por reformado de gas natural*, en el parque industrial de A Sionlla, se encuentran actualmente desocupadas y a la venta.

1.3.3 Conducciones de agua

Los riesgos más importantes en relación a las conducciones de agua instaladas previamente en la parcela son:

- Aparición de caudales importantes de agua por rotura de conducciones.
- Riesgo eléctrico por contacto con bombas de achique, líneas alimentadoras de las mismas u otras instalaciones.

Las medidas de protección propuestas para estos casos son:

- Toda conducción de agua existente en el emplazamiento de la obra se identificará antes del comienzo de los trabajos, recabando la información pertinente.
- En caso de que no se pueda proceder a su desvío o supresión, aun interfiriendo en la ejecución de la obra, se señalará oportunamente su trazado y se extremarán las medidas de precaución para evitar roturas. [2]

1.3.4 Líneas eléctricas enterradas

El riesgo más importante en cuanto a este aspecto es el riesgo de electrocución por contacto directo o indirecto. Las medidas de protección a considerar serán:

- Fijar el trazado y profundidad por información recibida o haciendo cartas con herramientas manuales, estudiando las interferencias respecto a las distintas zonas de actividad.
- Se solicitará a la compañía eléctrica el desvío o supresión de la línea eléctrica si interfiriese en la ejecución de las obras.
- En caso de que no sea posible el desvío o supresión, se señalará adecuadamente su trazado y profundidad en las zonas que interfiera con áreas de excavación u otros trabajos que pudieran afectar a la línea.

- En los trabajos que puedan causar riesgo de electrocución por contacto directo o indirecto con la línea eléctrica, se extremarán los medios para evitar riesgos de picado o rotura de línea. [2]

1.4 Análisis de riesgos profesionales durante la ejecución de la obra

Las diferentes fases de construcción de la obra pueden traer consigo importantes riesgos intrínsecos. A continuación se muestran las diferentes etapas críticas, indicando los principales riesgos, las cuales se incluyen dentro de los puntos del apartado 1.2 Datos generales de la obra.

1.4.1 Acondicionamiento del terreno

En la primera fase de la obra se llevan a cabo, entre otras operaciones, los movimientos de tierra necesarios para el acondicionamiento del terreno y la excavación de zanjas.

Los riesgos a los que se pueden ver sometidos los trabajadores que desempeñen estas tareas son, principalmente:

- Atropellos causados por maquinaria y vehículos.
- Vuelco de maquinaria, en especial durante las operaciones de carga y descarga de tierra.
- Caídas a igual o diferente nivel.
- Caídas de materiales y objetos.
- Golpes y proyecciones.
- Desprendimiento de tierras.
- Polvo y ruido.
- Trabajo en condiciones meteorológicas adversas, especialmente en zonas húmedas o mojadas. [2]

1.4.2 Cimentación y estructuras

Los riesgos a los que se pueden ver sometidos los trabajadores que desempeñen estas tareas son, principalmente:

- Caídas de personas, materiales y objetos a igual o diferente nivel.
- Ambientes con polvo en suspensión.

- Problemas cutáneos por contacto con el hormigón.
- Atropellos y otros accidentes durante la circulación de vehículos y maquinaria.
- Inhalación de vapores.
- Contactos eléctricos directos e indirectos.
- Radiación y quemaduras provocadas por las operaciones de soldadura.
- Hundimiento, caída o rotura de estructuras de sujeción o encofrado.
- Trabajo en condiciones meteorológicas adversas, especialmente en zonas húmedas o mojadas. [2]

1.4.3 Cubiertas y materiales ligeros

Constando entre los principales riesgos:

- Caídas de personas, materiales y objetos a igual o diferente nivel, con especial atención al hundimiento de las superficies de apoyo.
- Contactos eléctricos directos e indirectos.
- Aplastamientos y atrapamientos.
- Sobresfuerzos, lesiones o cortes en extremidades.
- Problemas cutáneos por contacto con el hormigón.
- Polvo y ruido.
- Trabajo en condiciones meteorológicas adversas, especialmente en zonas húmedas o mojadas. [2]

1.4.4 Cierres

- Caídas de personas, materiales y objetos a igual o diferente nivel.
- Contactos eléctricos directos e indirectos.
- Aplastamientos y atrapamientos.
- Sobresfuerzos, lesiones o cortes en extremidades.
- Problemas cutáneos por contacto con el hormigón.
- Polvo y ruido.
- Trabajo en condiciones meteorológicas adversas, especialmente en zonas húmedas o mojadas. [2]

1.4.5 Instalaciones auxiliares

En donde se incluyen instalaciones de fontanería, eléctricas, de gas, calefacción, etc.

- Caídas de personas, materiales y objetos a igual o diferente nivel.
- Contactos eléctricos directos o indirectos.
- Trabajo en ambientes pobres en oxígeno.
- Inhalación de gases y vapores.
- Radiación producida por las operaciones de soldadura.
- Quemaduras producidas por la soldadura u otras operaciones.
- Explosiones e incendios. [2]

1.4.6 Acabados

En donde se incluyen pintura, carpintería, vidriería, alicatados...

- Caídas de personas, materiales y objetos a igual o diferente nivel.
- Aplastamientos y atrapamientos.
- Sobresfuerzos, lesiones o cortes en extremidades.
- Contactos eléctricos directos o indirectos.
- Trabajo en ambientes pobres en oxígeno.
- Inhalación de gases y vapores, prestando especial atención a la intoxicación causada por diluyentes, colas, etc.
- Radiación producida por las operaciones de soldadura.
- Quemaduras producidas por la soldadura u otras herramientas de trabajo.
- Riesgos asociados al almacenamiento inadecuado de productos combustibles. [2]

1.5 Equipos de protección colectiva a utilizar en la obra

Una de las principales funciones del presente Estudio Básico es indicar las medidas de prevención y protección contra los riesgos laborales, mencionados en el apartado anterior. De este modo, en caso de que el riesgo pueda eliminarse, se adoptarán medidas a tal efecto; mientras que en el caso de no poder eliminarse completamente, se adoptarán las medidas de protección pertinentes para minimizar las consecuencias en caso de accidente.

Por lo tanto, de la identificación de riesgos laborales que se ha realizado y de los problemas específicos que plantea la construcción de la obra, se prevé utilizar las siguientes medidas en cada caso:

1.5.1 Acondicionamiento del terreno

- Realización de un estudio geotécnico del terreno para conocer y evaluar los problemas y peligros que implica.
- Uso de sistemas de contención como taludes, para prevenir los desplazamientos no deseados del terreno.
- Instalación de los sistemas de prevención necesarios para impedir la caída de personas o materiales.
- Medidas para localizar y minimizar los peligros debidos a conducciones enterradas. Tratadas en el apartado correspondiente al análisis de riesgos y medidas de protección relativas a las propias características del emplazamiento.
- Separar adecuadamente el tránsito de vehículos del de operarios, manteniendo las vías de circulación en buenas condiciones y libres de obstáculos.
- Correcta señalización de la zona de trabajo. [2]

1.5.2 Cimentación y estructuras

- La instalación y el desmontaje de estructuras provisionales o definitivas se hará bajo supervisión y control de una persona competente en la materia. Esta persona, o equipo, dispondrá el procedimiento que considere adecuado para el montaje y desmontaje con las acciones y consideraciones de seguridad que deban seguir los operarios, de modo que se minimicen los riesgos intrínsecos.
- Instalar estructuras auxiliares que protejan a los operarios de la fragilidad temporal de la obra, durante las etapas de montaje de estructuras y de cimentación, como pasarelas, escaleras auxiliares, barandillas, redes y demás elementos.
- Correcta iluminación y limpieza de la zona de trabajo. [2]

1.5.3 Cubiertas y materiales ligeros

Esta etapa de construcción presenta algunas características similares al caso anterior de Cimentación y estructuras, la obra puede no ser todo lo estable que se desearía. Se instalarán por

lo tanto elementos auxiliares similares a los anteriores, prestando especial atención a barandillas, escaleras de acceso acondicionadas y a redes de seguridad, dado que se trabaja en zonas de construcción elevadas.

Además se realizará la adecuada evacuación de los residuos derivados de la actividad de la obra, de modo que las zonas de trabajo y tránsito estén completamente libres de obstáculos.

1.5.4 Cierres

Se aplicarán medidas similares a las anteriores, considerando el empleo de elementos temporales de seguridad y prevención como redes, barandillas, escaleras, toldos, andamios, etc.

1.5.5 Instalaciones auxiliares

Una vez más la realización de trabajos en diversas partes de la planta, generalmente en condiciones de altura o subterráneas debe contar con elementos de seguridad temporales adecuados a cada situación.

1.5.6 Acabados

Medidas similares a las recogidas anteriormente, garantizando el buen estado de la maquinaria empleada y una buena señalización para la carga y descarga de material.

1.6 Equipos de protección individual

De la identificación y análisis de riesgos laborales que se ha realizado se desprende que existen una serie de ellos que no se han podido resolver con la prevención definida por las protecciones colectivas. Son los riesgos intrínsecos de actividades individuales a realizar por los trabajadores, que necesitarán por lo tanto, de equipos de protección individual (EPIs).

De acuerdo con el Real Decreto 773/1997, 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual, se entenderá por EPI cualquier equipo destinado a ser llevado o sujetado por el trabajador para que le proteja de uno o varios riesgos que puedan amenazar su seguridad o su salud en el trabajo, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin.

La utilización de equipos de protección individual se rige según la legislación europea por la Directiva 89/656/CEE, la cual se transpone a la legislación española mediante el Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, inscribiéndose asimismo dentro de las normas de desarrollo reglamentario previsto en el Artículo 6º de la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales. Asimismo, la utilización de EPIs debe de estar correctamente señalizada, la cual está regulada por la Directiva 92/58/CEE, traspuesta por el Real Decreto 485/1997, para conocer la obligatoriedad de su uso. [3]

La utilización de un EPI o de una combinación de EPI contra uno o varios riesgos puede conllevar una serie de molestias. Por consiguiente, a la hora de elegir un EPI apropiado, no sólo hay que tener en cuenta el nivel de seguridad necesario, sino también la comodidad. [4]

Su elección deberá basarse en el estudio y la evaluación de los riesgos complejos presentes en el lugar de trabajo. Esto comprende la duración de la exposición a los riesgos, su frecuencia y la gravedad, las condiciones existentes en el trabajo y su entorno, el tipo de daños posibles para el trabajador y su constitución física. [4]

Se pueden clasificar los EPIs de acuerdo a su función protectora del siguiente modo:

- Protectores de ojos y cara.
- Protección de pies y piernas.
- Protección de la cabeza.
- Protección de los oídos.
- Ropa protectora.
- Protección respiratoria. [5]

1.6.1 Protectores de ojos y cara

Para proteger los ojos y la cara se utilizan gafas, gafas con montura integral, pantallas faciales y elementos parecidos que impiden la penetración de partículas y cuerpos extraños, compuestos químicos corrosivos, humos y radiaciones. Con frecuencia es necesario proteger toda la cara frente a las radiaciones o los peligros de naturaleza mecánica, térmica o química.

Hay seis tipos básicos de protectores de los ojos y la cara:

- Gafas, con o sin protectores laterales.
- Gafas con montura integral.
- Pantallas que protegen las cuencas oculares y la parte central del rostro.
- Tipo casco, que protegen por completo la parte frontal del rostro.

- Pantallas protectoras de mano.
- Capuchas que cubren por completo la cabeza, como los cascos de buzo. [5]

1.6.2 Protección de pies y piernas

Para ello se emplean botas y diferentes tipos de calzado de seguridad. Para ello, suelen estar reforzados en la punta con chapa metálica, además de otras capas de refuerzo.

Dependiendo del ámbito de trabajo puede ser especialmente importante que la suela sea aislante, tanto eléctrica como térmicamente, y que además proporcione protección química, si fuese necesario.

Para evitar el riesgo de resbalamiento se usan suelas externas de caucho o sintéticas en diversos dibujos. Si se diese el caso, también se podrían requerir botas impermeables recubiertas en goma. [5]

1.6.3 Protección de la cabeza

Para proteger la cabeza de los riesgos de naturaleza mecánica, térmica e incluso eléctrica, se deben de emplear cascos de seguridad. No obstante, su función principal sigue siendo la de proteger frente a golpes o caídas de objetos.

Suelen estar fabricados en polietileno, de modo que sea un material resistente pero ligero, porque si no, su uso no sería practicable. Suelen tener un sistema de amortiguación también de polietileno, recubierto con almohadillas o cuero en las zonas de contacto con la cabeza para aumentar la ergonomía.

Además, los cascos pueden estar equipados con pantallas protectoras de los ojos o la cara hechas de plástico, malla o filtros ópticos. Pueden contar también con protectores de los oídos, cintas para sujetar el casco firmemente a la barbilla o a la nuca, y protectores de cuello o capuchas de lana para abrigarse del frío o el viento. [5]

1.6.4 Protección de los oídos

La forma más eficaz de evitar la pérdida auditiva debida al ruido es mantenerse lejos de zonas con ruido peligrosos. En muchos entornos de trabajo podría rediseñarse el proceso de producción de manera que los trabajadores pudiesen operar desde salas de control cerradas y

aisladas acústicamente. Pero cuando no es posible evitar el ruido o reducirlo en su origen, como suele ser el caso típico de las obras de construcción y edificación, los protectores auditivos se convierten en el último recurso.

En función de la fuente del ruido existen diversas soluciones para protegerse, que van desde simples tapones que sellan el conducto auditivo hasta cascos que cubren parte de la cabeza para prevenir la transmisión de vibraciones provocadas por un ruido muy intenso, pasando por orejeras u orejeras acopladas a cascos de protección. [5]

1.6.5 Ropa protectora

En un sentido general, el concepto de ropa de protección incluye todos los elementos que forman un conjunto protector, para el cuerpo entero o parte de él. Por tanto, la ropa de protección abarca desde un dedal que pueda evitar los cortes causados por los cantos de las hojas de papel, hasta el traje aislante completo con equipo de respiración autónomo que se utiliza en las situaciones de emergencia que siguen a los vertidos de compuestos químicos.

La ropa de protección puede ser de materiales naturales (algodón, lana y cuero, por ejemplo), sintéticos (nylon, plásticos o cauchos)

Dentro de la ropa protectora destacan los guantes, con el fin de proteger las manos de cualquier peligro. Existen diferentes tipos de guantes en función del peligro, así se tienen: guantes de protección mecánica, contra cortes y pinchazos, de protección térmica, de protección contra riesgos eléctricos, o guantes de protección química. [5]

1.7 Señalización

Como complemento de la protección colectiva y de los equipos de protección individual previstos, es necesario el uso de una señalización normalizada, que recuerde en todo momento los riesgos existentes a todos los que trabajan en la obra; en base a la Directiva 95/58/CEE del Consejo, de 24 de junio de 1992, y al Real Decreto 485/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en el trabajo.

1.8 Trabajos posteriores

En el artículo 5 del Real Decreto 1627/1997, sobre el estudio de seguridad y salud, también se indica que éste debe incluir previsiones e información útil para efectuar cuando sea necesario nuevas obras. Las operaciones de mantenimiento son inevitables en el futuro de la instalación y deben de estar sujetas a las condiciones de seguridad y salud.

1.9 Obligaciones de los distintos agentes que actúan en la obra

En una obra de construcción cada participante tiene sus obligaciones y ninguno de ellos debe saltárselas para no permitir un mal funcionamiento del plan de seguridad que puede terminar en un accidente. En la legislación española se recogen en el Real Decreto 1627/1997 y en el Real Decreto 1215/1997.

De este modo se pueden distinguir:

1.9.1 Obligaciones del promotor

El promotor es cualquier persona física o jurídica por la cual se realiza la obra. Este designa a un coordinador de seguridad y salud antes del inicio de las obras si en la ejecución intervienen más de una empresa o autónomos, como suele ser el caso. El promotor no es eximido de responsabilidades por el coordinador y este debe efectuar un aviso a la autoridad laboral competente antes del comienzo de las obras, que redactará según lo recogido en el Real Decreto 1627/1997.

1.9.2 Obligaciones del coordinador en materia de seguridad y salud

El coordinador durante la ejecución de la obra es el técnico competente integrado en la dirección facultativa, designado por el promotor para llevar a cabo las tareas que se recogen en el artículo 9 del Real Decreto 1627/1997, entre las que se incluyen:

- Coordinar la aplicación de los principios generales de prevención y de seguridad.
- Coordinar las actividades de la obra para garantizar que los contratistas, subcontratistas y trabajadores autónomos apliquen de manera coherente y responsable los principios de acción preventiva que se recogen en el artículo 15 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales durante la ejecución de la obra.

- Aprobar el plan de seguridad y salud elaborado por el contratista.
- Adoptar las medidas necesarias para que sólo las personas autorizadas puedan acceder a la obra.

1.9.3 Obligaciones del contratista y subcontratista

El contratista es la persona física o jurídica que asume contractualmente ante el promotor, con medios humanos y materiales, propios o ajenos, el compromiso de ejecutar la totalidad o parte de las obras, sujeto al proyecto y al contrato. Mientras que, por otra parte, el subcontratista es la persona física o jurídica que asume ante el contratista el compromiso de realizar partes o instalaciones de la obra, sujeto al proyecto.

En el artículo 11 del Real Decreto 1627/1997 se les obliga, entre otros aspectos, a lo siguiente:

- Aplicar los principios de acción preventiva que se recogen en la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.
- Cumplir y hacer cumplir a su personal lo establecido en el plan de seguridad y salud.
- Informar y proporcionar las instrucciones adecuadas a los trabajadores autónomos sobre todas las medidas que hayan de adoptarse en lo que se refiere a su seguridad y salud en la obra.
- Atender las indicaciones y cumplir las instrucciones del coordinador en materia de seguridad y salud durante la ejecución de la obra.

A su vez, serán responsables de la ejecución correcta de las medidas preventivas fijadas en el plan de seguridad y salud en lo relativo a las obligaciones que les correspondan a ellos directamente o a los autónomos contratados por ellos. Además, las responsabilidades de los coordinadores, de la dirección facultativa y del promotor no eximirán de sus responsabilidades a los contratistas y a los subcontratistas.

1.9.4 Obligaciones de los trabajadores autónomos

Los trabajadores autónomos son las personas físicas que realiza de forma personal una actividad profesional, asumiendo ante el promotor o contratistas el compromiso de realizar determinadas partes de la obra. Pasaría a ser un subcontratista si emplea a trabajadores ajenos en la obra. Según el artículo 12 del Real Decreto 1627/1997 están obligados, entre otros aspectos a:

- Aplicar los principios de la acción preventiva que se recogen en la Ley de Prevención de Riesgos Laborales.
- Cumplir las disposiciones mínimas de seguridad y salud del Real Decreto 1627/1997
- Ajustar su actuación en la obra conforme a los deberes de coordinación de actividades empresariales establecidos en la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, participando en particular en cualquier medida de actuación coordinada que se hubiera establecido.
- Utilizar equipos de trabajo que se ajusten a lo dispuesto en el Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.
- Elegir y utilizar equipos de protección individual en los términos previstos en el Real Decreto 773/1997.
- Atender las indicaciones, cumplir las instrucciones del coordinador en materia de seguridad y salud durante la ejecución de la obra.
- Cumplir lo establecido en el Plan de Seguridad y Salud.

1.10 Plan de Seguridad y Salud en el Trabajo

El empleador, antes de iniciar la obra, debe de elaborar un Plan de Seguridad y Salud en el que se analice, estudien, completen y desarrollen las indicaciones marcadas en el presente Estudio Básico de Seguridad y Salud, de acuerdo a lo establecido por el artículo 7 del Real Decreto 1627/1997.

El Plan deberá de ser aprobado, también antes del inicio de la obra, por el coordinador en materia de seguridad y salud.

Podrá ser modificado por el contratista en función del proceso de ejecución de la obra, de la evolución de los trabajos y de las posibles incidencias o modificaciones que puedan surgir a lo largo de la obra.

1.11 Libro de incidencias

Conforme a lo establecido por el Real Decreto 1627/1997, en la obra de construcción de la planta se tiene que disponer, con fines de control y seguimiento del Plan de Seguridad y Salud, de un libro de incidencias. Dicho libro estará en poder del coordinador en materia de

seguridad y salud o, en su caso, en poder de la dirección facultativa. A él tendrán acceso los contratistas y subcontratistas, los trabajadores autónomos, así como las personas u órganos con responsabilidades en materia de prevención en las empresas intervinientes en la obra, los representantes de los trabajadores y los técnicos de los órganos especializados en materia de seguridad y salud en el trabajo de las Administraciones públicas competentes, quienes podrán hacer anotaciones en el mismo, relacionadas con los fines que al libro se le reconocen en el Real Decreto 1627/1997. Con cada anotación, el coordinador está obligado a remitir en un plazo de 24 horas, una copia a la Inspección de Trabajo y Seguridad Social de la provincia de la Coruña, al contratista afectado y a los representantes de los trabajadores.

1.12 Paralización de los trabajos

Cuando el coordinador en materia de seguridad y salud observe el incumplimiento de las medidas establecidas durante el desarrollo de los trabajos, debe advertir al contratista y dejar constancia en el libro de incidencias, pudiendo paralizar las obras en caso de riesgo grave e inminente para la seguridad. Al hacer una anotación en el libro de incidencias, deberá informar a los agentes recogidos en el apartado anterior del presente Estudio Básico.

1.13 Derechos de los trabajadores

El capítulo III del Real Decreto 1627/1997 trata de los derechos de los trabajadores de las obras de construcción. De este modo, los contratistas y subcontratistas deberán garantizar que los trabajadores reciben una información adecuada y comprensible de todas las medidas que sea necesario adoptar en lo que se refiere a la seguridad y salud. Además, como se ha mencionado anteriormente, facilitarán una copia del Plan de Seguridad y Salud a efectos de su conocimiento y seguimiento a los representantes de los trabajadores.

2. ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

A continuación se tratará el estudio del impacto ambiental de la presente planta de reformado con vapor, según los mínimos descritos por la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Dicha Ley define la evaluación de impacto ambiental como: “el conjunto de estudios y análisis técnicos que permiten estimar los efectos que la ejecución de un determinado proyecto puede causar sobre el medio ambiente”.

El presente proyecto se incluye dentro del Grupo 5 del Anexo I de la mencionada Ley 21/2013: “Industria química, petroquímica, textil y papelera”. Según el Artículo 7 toda industria recogida en el Anexo I será objeto de una evaluación de impacto ambiental ordinaria.

2.1 Descripción general del proyecto

El proceso se basa en el reformado de gas natural con vapor de agua para producir hidrógeno. Tiene una capacidad de 38000 Nm³/h (28900 t/año) de este gas y sus posteriores aplicaciones pueden ser para su empleo como combustible en medios de transporte terrestres o para otras industrias.

El emplazamiento elegido está en el polígono industrial 223-A Sionlla, cerca de la ciudad de Santiago de Compostela.

Las principales etapas de las que consta son:

- **Pretratamiento:** En primer lugar se procede a la desulfuración del gas natural para recuperar todo el azufre presente por ser un veneno para los catalizadores de los reactores posteriores. A continuación, se mezcla el gas natural con vapor de agua para su posterior reacción y con el hidrógeno de reciclaje, debido a que reduce la formación de coque en el reformador.
- **Transformación química:** Se procede a la transformación química de la alimentación en hidrógeno empleando un reactor principal, el reformador, y otros dos posteriores (HTS y LTS) para la eliminación del CO producido y aumentar la producción de H₂.
- **Eliminación de CO₂ y purificación:** A continuación se separa otro co-producto, el CO₂, en una columna de absorción para su posterior recuperación. Este gas se almacena para su posible uso en otras industrias reduciendo las emisiones de la planta.

La última etapa del proceso es la de purificación. Consiste en la purificación del H_2 producido en un sistema PSA donde se produce un gas residual que se emplea como combustible en el reformador y parte se recircula junto con la alimentación. Gracias a esto se evita el venteo de dicho gas y se reduce el gasto de combustible en el reformador.

A continuación se enumeran las emisiones contaminantes producidas por la presente planta de producción de hidrógeno a partir de gas natural. En concreto, los posibles contaminantes producidos se pueden clasificar en función de su estado físico en:

- Gaseosos
- Líquidos
- Sólidos

Además de otros tipos de contaminación como la acústica y la visual.

En el Apartado 2.4 de Identificación y valoración de impactos se detalla con más detalle estos impactos y el daño que pueden producir al medio.

2.2 Análisis de alternativas viables

2.2.1 Justificación del emplazamiento

Como emplazamiento se busca un polígono industrial en el que la planta de reformado con vapor pueda integrarse reduciendo el daño al medio natural existente. Las principales razones por las que se elige el polígono de A Sionlla como emplazamiento para la presente planta industrial se basan en:

- Desarrollo de socio-económico de Galicia, así como de la ciudad de Santiago de Compostela.
- Proximidad de la materia prima, procedente de Reganosa, situada en Mugardos.
- Disponibilidad de terreno, siendo necesaria una parcela suficientemente grande para albergar a dicha planta.
- Buenas características del polígono de A Sionlla, teniendo buenos accesos.
- Existencia de mano de obra cualificada y no cualificada próxima.

La parcela seleccionada dentro de dicho polígono presenta una superficie total de 44.932 m² permitiendo un uso industrial de cualquier tipo.

Debido a que, como todos los polígonos, el de A Sionlla está diseñado para albergar industria, el impacto paisajístico y al medio es más reducido que buscar un nuevo emplazamiento no dispuesto para tal fin.

2.2.2 Justificación de la tecnología

De todas las alternativas posibles para producir hidrógeno se elige el proceso de reformado de gas natural con vapor de agua debido a que es el proceso de alto volumen de producción de menor coste. Esto se debe a que el objetivo es producir hidrógeno asequible a gran escala para su posterior uso en la creación de otros productos y para impulsar su empleo en el transporte. Esto último es de vital importancia si se quiere realizar una futura economía basada en el hidrógeno, donde esta tecnología serviría de puente a otras más limpias.

Dentro de las posibles materias primas de origen fósil, el empleo de gas natural produce menores emisiones contaminantes debido a su menor contenido en azufre y otros compuestos que los combustibles líquidos y el carbón, los cuales necesitarían unos procesos de pretratamiento más elaborados.

El proceso a partir de carbón es interesante solamente con capacidades de producción muy elevada, debido a que se reducen los costes con su aumento. Aún así, el proceso es más complejo que el reformado de gas natural y, en general, el coste del hidrógeno producido por gasificación de carbón es más alto. Sin embargo, puede convertirse en un procedimiento de producción competitivo conforme los precios del gas natural aumenten. [6]

Además de los combustibles fósiles, se puede emplear la biomasa como materia prima en procesos como los biológicos, los cuales son muy lentos, o en termoquímicos como la pirólisis y la gasificación. El interés del empleo de la biomasa es que presenta emisiones globales menores debido a que esta materia orgánica es capaz de capturar CO₂ durante su ciclo de vida. Un problema que presenta es que tiene menor densidad energética que los fósiles, aumentando los gastos de transporte y obtención. De este modo, para minimizar dichos costes de transporte, habría que disponer de cantidades ingentes de biomasa en las proximidades de los centros de producción, y entre los diferentes tipos de biomasa, se optaría por cultivar aquellas especies con una mayor densidad energética alterando el ecosistema y reduciendo la biodiversidad de la zona. [6]

La producción de hidrógeno a partir de otros recursos renovables como el agua se descarta por diversas razones. El proceso de electrolisis necesita un suministro de energía muy alto encareciendo mucho el hidrógeno producido, aunque por otro lado, dependiendo de la

fuelle de energía, puede presentar o no emisiones contaminantes. Además de ello, otros procesos que también emplean el agua como el de fotoelectrolisis y el de descomposición por ciclos termoquímicos aún están en fase de desarrollo, con lo que el empleo de esta tecnología a gran escala aún no es posible. [6]

En definitiva, el proceso de reformado de gas natural con vapor de agua respecto a otros procesos como el de electrolisis del agua, produce más emisiones contaminantes pero, como se comentó antes, son reducidas al mínimo gracias a la captura del CO₂ producido como co-producto y al aprovechamiento de los gases residuales del PSA. Aún así, las emisiones producidas se deben principalmente a la quema de combustible en el reformador R-201, pero éstas son mitigadas ya que se elige gas natural como medio calefactor debido a su menor carácter contaminante que los combustibles sólidos y líquidos.

En la selección de la tecnología empleada en el diseño de la planta se toman como referencia las Mejores Técnicas Disponibles (MTD), las cuales buscan la mejora de la eficiencia de multitud de industrias minimizando el impacto ambiental.

Las Mejores Técnicas Disponibles se encuentran en los documentos BREF y se clasifican en función del tipo de industria al que hacen referencia. En concreto, el principal BREF a aplicar a una planta de reformado con vapor es *Large Volume Inorganic Chemicals-Ammonia, Acids and Fertilisers* publicado en agosto del 2007. [7]

Las diferentes etapas del proceso de reformado de vapor tradicional se pueden mejorar para aumentar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental. Aún así, debido a que el reformador R-201 es el equipo que presenta mayor consumo energético y de combustible, es donde se pueden aplicar mayor cantidad de acciones. Las características mejoradas para lograr tal objetivo son: [7]

- Emplear quemadores de baja producción de óxidos de nitrógeno (NO_x). Para reducir las emisiones de NO_x en los gases de combustión del reformador se puede hacer una serie de modificaciones en la sección de combustión. Los parámetros que influyen en su formación son la temperatura máxima de la llama, la disponibilidad de oxígeno y el tiempo de residencia en la zona de combustión. Los quemadores de baja producción de NO_x reducen su formación mediante el control de estos factores y del aire de combustión y/o gas combustible.
- Incrementar la temperatura de entrada a los tubos empacados del reactor para reducir el gasto de combustible. Para ello se puede instalar un nuevo y mejorado sistema de precalentamiento de alta aleación en la sección de convección del

reformador. De esta forma se reducen los requerimientos de calor en la zona de combustión.

- Precalentar el aire de combustión del reformador, lo cual reduce el gasto de combustible pero puede aumentar la formación de NO_x al ser mayor la temperatura de quemado.
- Emplear la tecnología SNCR (reducción no catalítica selectiva) para reducir la formación de NO_x en el reformador. Este método emplea la inyección de un aditivo en la cámara de combustión y transforma los óxidos de nitrógeno en nitrógeno y agua. Esta reacción tiene lugar sin un catalizador a temperaturas de entre 850 y 1100 °C. En plantas de amoníaco, es usual emplear el propio amoníaco como el agente reductor. Gracias a esto se pueden lograr emisiones de NO_x más bajas de 140-160 mg/Nm^3 pero emitiendo amoníaco en rangos de 1-5 mg/Nm^3 (el límite está en 10 mg/Nm^3).
- Recuperar energía después del reformador para producir vapor sobrecalentado.
- Mejorar el diseño del reactor HTS para poder usar relaciones de vapor/carbono menores.
- Emplear sistemas de eliminación de CO_2 de la corriente de proceso de baja energía. Los sistemas que emplean disolventes consumen menos energía que otros, por ello se utiliza un sistema de absorción con aminas. Además de ello, existe la posibilidad de emplear el CO_2 de alta pureza recuperado en otros procesos, como en el de producción de urea.
- Emplear una unidad Claus para recuperar azufre a partir del H_2S obtenido en la etapa de desulfuración de la materia prima.
- Recircular los condensados incorporándolos al vapor de agua aportado en la entrada del reformador.
- Control del desecho de catalizadores desactivados y recuperación de metales. En la actualidad existen compañías que ofrecen servicios para el manejo correcto de los catalizadores agotados durante su descarga, con un posterior transporte a los sitios de deposición seguros para el ambiente o a instalaciones de recuperación de metales.
- Reducción de las emisiones contaminantes en los procesos de arranque y parada de la planta. Durante estas etapas del proceso se ventea gas natural y producto hasta que se alcanza el nivel de operación normal. Para reducir estas emisiones se pueden recortar los tiempos de arranque y parada utilizando secuencias mejoradas, reciclar gases inertes para el precalentamiento y quemar gases venteados no tratables, entre otros.

Implementar estas mejoras proporciona una serie de beneficios, los cuales se listan a continuación: [7]

- Reducir el impacto ambiental.
- Reducir emisiones de NO_x por debajo de 200 mg/Nm^3 .
- Reducción del consumo energético.
- Aumento de la eficiencia de la combustión en el reformador.
- Recuperación de energía.
- Posibilidad de venta de azufre y de CO_2 puro para su aprovechamiento en otras industrias.
- Reducción de aguas residuales.

2.3 Descripción y valoración del inventario ambiental

El inventario ambiental es el estudio del estado del lugar y de sus condiciones ambientales antes de la realización de la obra, así como de los tipos existentes de ocupación de suelo y aprovechamiento de recursos naturales. [8]

Los elementos ambientales a estudiar son: fauna, flora, suelo, agua, aire, clima, paisaje, patrimonio histórico-artístico, relaciones sociales y condiciones de sosiego público. [8]

2.3.1 Clima

A continuación se detalla el clima de la mitad sur de la provincia de A Coruña, zona en la que está situado el polígono de A Sionlla.

En esta zona, las rías de Muros, Noia y Vilagarcía conforman una puerta de entrada para los húmedos vientos de procedencia atlántica, los cuales son elevados suavemente por una topografía claramente favorable y donde dejan importantes cantidades de agua, especialmente en otoño e invierno, y en los años en que se acentúa la persistencia de la circulación del oeste, las llamadas situaciones de poniente. Las lluvias son más importantes hacia el interior, debido al estancamiento provocado por los sistemas montañosos que la limitan hacia el este, produciéndose precipitaciones medias superiores a los 2000 l/m^2 en las proximidades de Santiago y Ordenes. La zona en su conjunto, queda bastante protegida de los vientos del primer y segundo cuadrante, lo que produce un notable contraste de temperaturas respecto al resto de la provincia cuando se producen estos vientos. [9]

La temperatura del aire depende en gran medida de la naturaleza del suelo debido a su capacidad de absorber y transmitir la energía solar. La temperatura media anual del área del polígono de A Sionlla está entre 14 y 15 °C con una amplitud térmica de 13 °C. [10]

Galicia se encuentra entre las regiones más lluviosas de Europa occidental. La precipitación anual acumulada en la zona colindante a la ciudad de Santiago de Compostela está entre 1400-1600 mm, siendo invierno y otoño las estaciones más lluviosas. [10]

En la Tabla 1 se recogen las temperaturas y las precipitaciones medias a lo largo del año en la zona del parque industrial de A Sionlla.

Tabla 1. Temperaturas y precipitaciones medias en el polígono de A Sionlla por estación del año. Fuente: [10]

	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
Temperatura (°C)	12-14	16-18	>20	14-16
Precipitaciones (mm)	400-500	300-400	100-200	500-600

2.3.2 Calidad del aire

La calidad del aire y la protección de la atmósfera están controladas por la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. Esta Ley regula las emisiones de los contaminantes atmosféricos, los cuales son: óxidos de azufre y otros compuestos de azufre, óxidos de nitrógeno y otros, óxidos de carbono, ozono, compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y compuestos orgánicos persistentes, metales y sus compuestos, material particulado, halógenos y sus compuestos y cianuros, entre otros.

Según la Ley 34/2007, los factores a tener en cuenta para el establecimiento de los umbrales de alerta son: grado de exposición humana, condiciones climáticas, sensibilidad de la fauna y flora, patrimonio histórico expuesto a los contaminantes, viabilidad económica y técnica, transporte a larga distancia de los contaminantes y mecanismos específicos de formación de cada componente.

El Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, establece los límites permitidos para cada contaminante en el aire expresados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a una temperatura de 298 K y una presión de 101,3 kPa.

En la Tabla 2 se recogen los valores de alerta para algunos de los contaminantes producidos por la presente planta de reformador de gas natural según el Real Decreto 102/2001.

Por umbral de alerta se entiende el nivel a partir del cual una exposición breve puede suponer un riesgo para la salud.

Tabla 2. Umbrales de alerta para algunos contaminantes emitidos al aire. Fuente: Real Decreto 102/2011

Contaminante	Umbral de alerta ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Dióxido de azufre	500
Dióxido de nitrógeno	400

En la Figura 1 se recoge la evolución de las emisiones industriales originadas en la provincia de A Coruña durante los últimos años. Como se puede observar, la tendencia de dichos contaminantes es descendente, destacando la bajada de SO_2 entre 2006 y 2008 por la aplicación de mejoras para los combustibles (Real Decreto 287/2001 del 16 de marzo para la reducción del contenido en azufre de determinados combustibles líquidos) y las medidas del Plan Nacional de Reducción de Emisiones (PNRE) del 2004 (afecta principalmente a las centrales termoeléctricas de As Pontes y Meirama). [11]

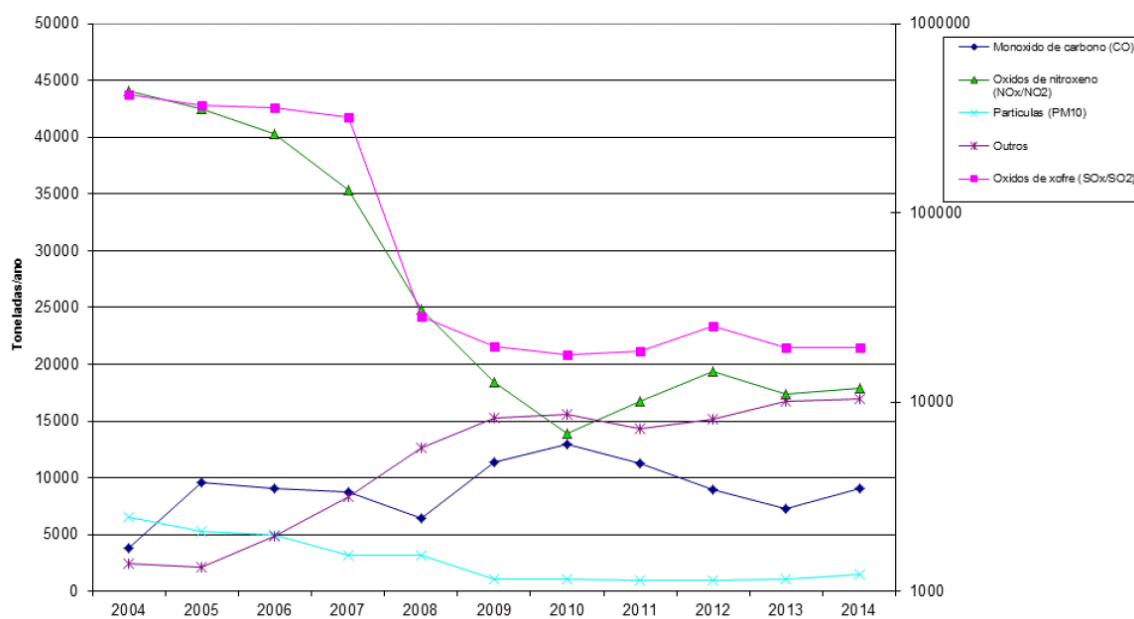


Figura 1. Evolución de las emisiones industriales en la provincia de A Coruña entre 2004 y 2014 (las emisiones de SO_x están en escala logarítmica). Fuente: [11]

2.3.3 Hidrología y geología

La provincia de A Coruña ofrece una gran variedad petrográfica como consecuencia de la compleja geología que ofrece las series más antiguas de la escala estratigráfica de la Península Ibérica, así como sus variadas intrusiones plutónicas. [9]

La composición litológica de la cuenca urbana de Santiago y alrededores, donde se sitúa el polígono de A Sionlla, está formada fundamentalmente por rocas cristalinas del tipo granitos, que provocan suelos de alta permeabilidad fuertemente lavados y con un carácter ácido. También se encuentran en el área rocas básicas, del tipo anfibolitas, con características edafológicas singulares. [12]

Los materiales que constituyen el substrato geológico están orientados en bandas de dirección aproximadamente N-NW a S-SE en las que alternan de sur a norte: esquistos cuarcitosos de Grupo de Laxe, granito de dos micas de grano medio y grueso, esquistos y paragneis del Complejo de Noia y ortogneis biotítico. [13]

Las características hidrogeológicas de estos materiales se podrían subdividir en dos grandes grupos: granitos y ortogneis, con permeabilidad media y esquistos y anfibolitas, de permeabilidad baja. [13]

El río más importante cercano al parque industrial de A Sionlla es el río Sar, el cual es un afluente del Ulla. Nace a 300 metros de altitud en Meixonfrío y recorre las parroquias compostelanas de Sar, Conxo y Laraño. Drena una cuenca de 265,5 km² ayudado por los ríos Sarela y Roxos. Es un río muy utilizado para verter residuos y su estado ecológico y químico es malo. Este río de Santiago presenta unas condiciones lamentables en cuanto a pureza de sus aguas y estado de sus riberas. [14]

En la Figura 2 se muestra el mapa geológico de la cuenca alta del río Sar, donde se sitúa el polígono de A Sionlla.

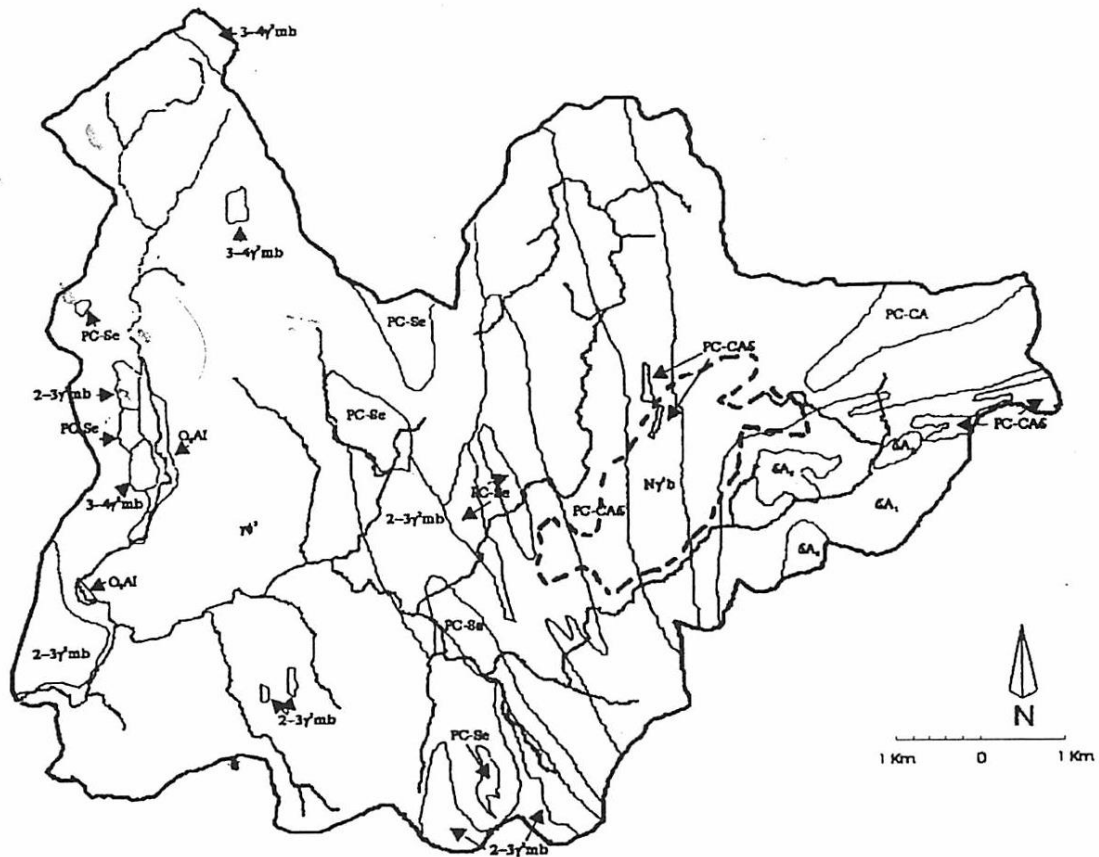


Figura 2. Mapa geológico de la cuenca alta del río Sar. Línea rayada: cuenca urbana de Santiago. Fuente: [13]

2.3.4 Flora y fauna

En Santiago hay una gran variedad de fauna, donde se puede cifrar en un mínimo de 13 anfibios, 12 reptiles, 63 aves y 32 mamíferos que habitan en esta zona geográfica. Esta variedad de animales es un reflejo de la profusión de biotopos que se encuentran en una zona relativamente pequeña en extensión pero que habitan en un medio fuertemente humanizado. [12]

La flora está formada por pinos y eucaliptos, los cuales destacan en el paisaje en cuanto a formaciones de árboles en la tierra de Santiago, esto es debido a una intensa labor de repoblación forestal con especies autóctonas que incidió de forma negativa sobre las formaciones de árboles propias del país, provocando una pérdida de calidad botánica, ya que se produjo un empobrecimiento florístico y una degradación del suelo. [12]

El pinar domina sobre el eucalipto y dentro de los pinos el más abundante es el bravo (*Pinus pinaster*), aunque que se encuentran bosquetes de pino de repoblación (*Pinus insignis*) y a veces mezcla de ambos. El manso (*Pinus pinea*) sólo aparece representado por ejemplares muy

dispersos y generalmente cerca de algunas casas de labranza. En el sotobosque de los pinares aparecen matorrales. [12]

Además de ello, Santiago está entre dos zonas faunísticas y florísticas de diferente tipo (la eurosiberiana en su provincia atlántica y la mediterránea), las cuales presentan árboles de hoja caduca, del tipo de robledales, y otros de hoja perenne como el alcornoque. [12]

2.3.5 Paisaje

La cuenca de Santiago de Compostela se encuentra a 260 metros sobre el nivel del mar y está circunscrito por los castros originarios de Santa Susana, A Sionlla, Meixonfrío, San Marcos y monte Viso. Son puntos de referencia el Pico Sacro, los montes Pedroso y Viso y las riberas del Sar y del Sarela. [12]

La tierra de Santiago es una zona de contacto de dos zonas faunísticas y florísticas: la eurosiberiana en su provincia atlántica y la mediterránea. La eurosiberiana, asentada en el valle del Tambre, se caracteriza por la presencia de bosques de hoja caduca, tipo robledales, mientras que la mediterránea con influencia atlántica se manifiesta en el valle del Ulla, allí donde los bosques son de árboles de hoja perenne, como el alcornoque. Esta mezcla le da una gran riqueza a la zona y ofrece valores naturales para los interesados en el conocimiento del entorno. [12]

Otro factor que influye en el paisaje es la acción del hombre sobre el mismo, caracterizado por la profusión de tierras de cultivos, una intensa deforestación y un alto impacto de repoblación forestal con especies autóctonas, que hizo retroceder los bosques naturales a pequeñas manchas en las riberas de los ríos y en otras zonas determinadas. [12]

El relieve constituye un escalón intermedio entre los macizos montañosos de la Galicia oriental, que forman la dorsal gallega, donde nacen los ríos Tambre y Ulla, y los bloques costeros de los que está separado por la fosa Padrón-Tui, en el denominado escalón de Santiago. [12]

2.3.6 Ruido

El polígono de A Sionlla es un área creada con el fin de albergar industria principalmente. Por ello, va a presentar un cierto nivel de ruido debido a la operación normal de los equipos industriales allí situados.

La normativa nacional que regula los niveles de ruido es la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido. Según el Real Decreto 106/2015, de 9 de julio, sobre la contaminación acústica de Galicia, las infraestructuras nuevas de situadas en dicha comunidad deberán alcanzar los objetivos de calidad acústica establecidos por el artículo 24.1 en relación con el Anexo III del Real decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 7 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

A continuación, se listan en la Tabla 3 los límites de ruido en función del tipo de área acústica para una aplicación industrial según el Anexo III del Real decreto 1367/2007, del 19 de octubre.

Tabla 3. Valores límite de inmisión de ruido aplicables a infraestructuras portuarias y a otras actividades, como la industrial. Fuente: Real Decreto 1367/2007

Tipo de área acústica	Índices de ruido		
	$L_{k,d}$	$L_{k,e}$	$L_{k,n}$
- Sectores con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requieran especial protección contra contaminación acústica	50	50	40
- Sectores con predominio de suelo de uso residencial	55	55	45
- Sectores con predominio de suelo de uso terciario	60	60	50
- Sectores con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos	63	63	53
- Sectores con predominio de suelo de uso industrial	65	65	55

Los métodos de cálculo recomendados para la evaluación de los índices de ruido L_d , L_e y L_n , son los establecidos en el apartado 2, del anexo II del Real Decreto 1513/2005, del 16 de diciembre, donde:

- L_d : es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado definido en la norma ISO 1996-2: 1987, determinado a lo largo de todos los períodos día de un año.
- L_e : es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado definido en la norma ISO 1996-2: 1987, determinado a lo largo de todos los períodos tarde de un año.
- L_n : es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado definido en la norma ISO 1996-2: 1987, determinado a lo largo de todos los períodos noche de un año.

Donde al día le corresponden 12 horas, a la tarde 4 horas y a la noche 8 horas.

2.3.7 Medio socio-económico

El estudio socio-económico indica cómo la población va a beneficiarse y/o sufrir los cambios producidos por la nueva actividad. Estos cambios pueden ser en su economía, en su uso de los servicios, en el cambio del paisaje y, en definitiva, en el uso del terreno. [8]

En los inventarios socio-económicos pueden tratarse los siguientes puntos:

- El sistema territorial.
 - La distribución y extensión de los núcleos de población afectados
 - Usos del suelo
 - La red viaria
- La demografía de los núcleos de población afectados.
 - La evolución
 - Los movimientos
 - El nivel de instrucción
 - La población activa
- El sistema económico.
 - Sector primario: agricultura, ganadería, silvicultura, zaca, pesca, minería
 - Sector secundario: industria, construcción, producción energética
 - Sector terciario: servicios, comercio, transporte, hostelería, administración
- El sistema socio-cultural.
 - Patrimonio histórico-cultural
 - Caracteres culturales
- El planteamiento urbanístico. [8]

A continuación se describe con más detalle algunos de estos aspectos.

2.3.7.1 Sistema territorial

El polígono de A Sionlla está situado al noreste de la ciudad de Santiago de Compostela. Está delimitado por la AP-9 y el ferrocarril del Eje Atlántico por el sur, por el tramo previsto del nuevo orbital ferroviario de la ciudad de Santiago de Compostela por el este, la fábrica FINSA y el nuevo polígono de Costa Vella por el norte, y este mismo polígono y el Vial Periférico de la ciudad (Circunvalación N-550) por el oeste. En total presenta una superficie de 1.382.799 m², donde el suelo disponible para las parcelas es de 758.278 m². [15]

El mayor núcleo de población cercana es la ciudad de Santiago de Compostela, capital de la comunidad autónoma de Galicia. Además, se encuentra a las siguientes distancias a otras ciudades de gran índole en Galicia: [16]

- A Coruña: 73 km.
- Ferrol: 91 km.
- Lugo: 110 km.
- Ourense: 106 km.
- Vigo: 92 km.
- Pontevedra: 67 km.

Un punto fuerte de A Sionlla es su facilidad de comunicaciones. Tiene un acceso inmediato a dos de las principales autovías gallegas, la AP-9 y la A-54, así como a la nacional N-550. Además el aeropuerto de Lavacolla se encuentra apenas a 15 minutos de distancia. [16]

2.3.7.2 Análisis demográfico

A continuación se va a hablar de la población colindante al polígono en cuestión. El municipio de Santiago de Compostela presenta una población de 95.612 personas, a 1 de enero de 2015, donde 44.388 son hombres y 51.224 mujeres. Por otro lado, la población del núcleo de Santiago es de 79.511 personas, donde la distribución por géneros es de 36.587 hombres y 42.924 mujeres. [17]

La evolución de la población en la provincia de A Coruña por sexos en los últimos años se recoge en la Figura 3.

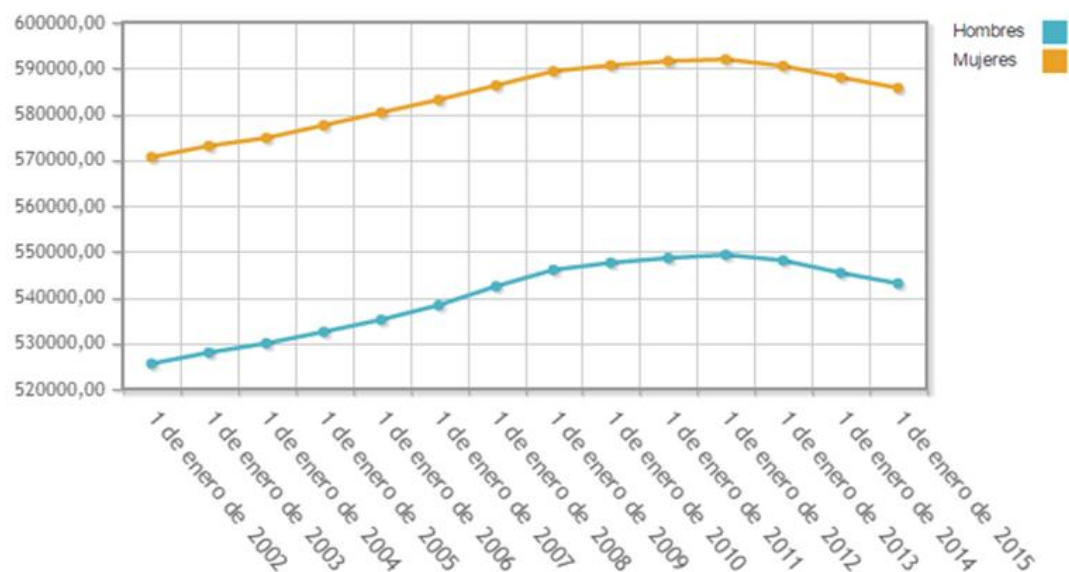


Figura 3. Población por géneros en la provincia de A Coruña en los últimos años. Fuente: [18]

2.3.7.3 Sistema económico

La ciudad de Santiago de Compostela presenta una economía con una fuerte base en el turismo y el sector terciario, mientras que el industrial está en desarrollo. [19]

La población activa en la provincia de A Coruña a principios del 2016 se corresponde al 54,24 %, la tasa de empleo es de un 45,51 % y la de desempleo un 16,11 %. [20]

La distribución de la población activa en la provincia de A Coruña en los últimos años por sectores económicos se recoge el Figura 4.

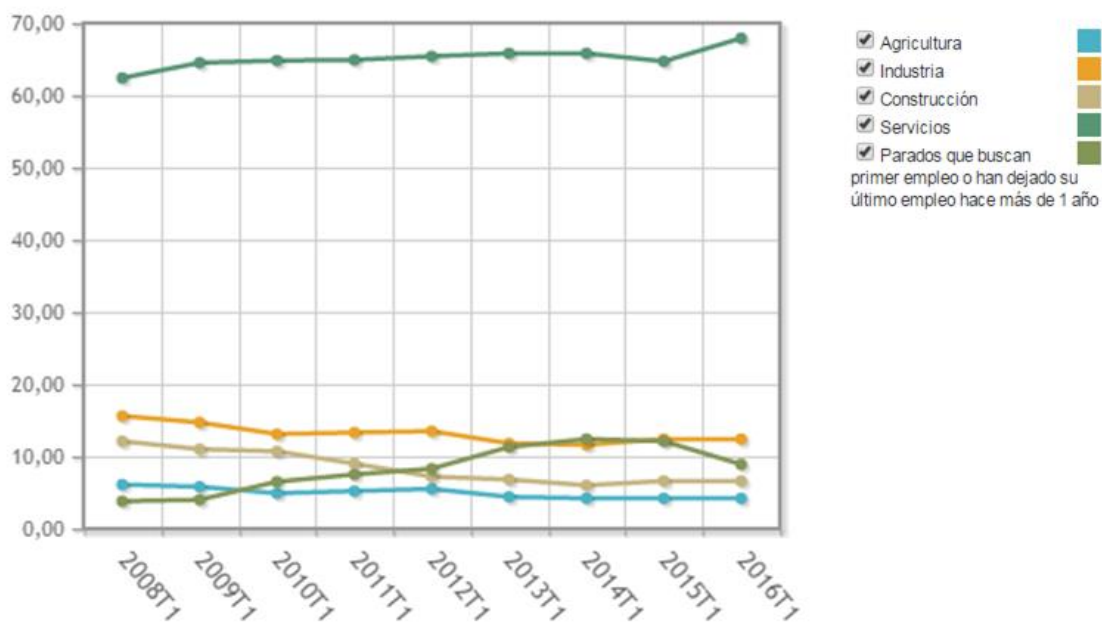


Figura 4. Encuesta de la población activa en la provincia de A Coruña por sectores en % de población. Fuente: [19]

Compostela, a través de la Concejalía de Promoción Económica y de la empresa Emuvisa, está realizando un esfuerzo sostenido para ampliar la oferta y la previsión del suelo industrial en el que acoger nuevas iniciativas empresariales. [21]

Actualmente el término municipal contabiliza 2,5 millones de metros cuadrados de suelo industrial consolidado. Además, el Ayuntamiento tiene previsto el desarrollo urbanístico de 3,7 millones de metros cuadrados más para la instalación de empresas industriales. Se prevé que los nuevos polígonos empresariales supongan la creación de 12.000 nuevos empleos en Santiago de Compostela. En concreto se están impulsando y ampliando polígonos industriales como el de Costa Vella, en Amio, el del Tambre y de Formarís, en Boisaca, el de Lavacolla y el de A Sionlla. [21]

El objetivo final es crear un área empresarial de casi seis millones de metros cuadrados, con lo que se correspondería al parque empresarial más grande de Galicia. [21]

Algunas de las empresas que se instalarán próximamente en el polígono de A Sionlla son Supervisión y Control SA, la entidad que se ocupa en Galicia del control técnico de los vehículos, Caldas de Oil SL, la cual cuenta con estaciones de servicio en distintos puntos del territorio gallego, y la empresa compostelana Míguez Cutrín, firma especializada en andamiajes. [22]

2.3.7.4 Sistema socio-cultural

El mayor centro cultural cercano es Santiago de Compostela, la cual en 1985 fue declarada ciudad Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO y en el año 2000 “Ciudad Europea de la Cultura”. [23]

La peregrinación a Santiago fue el acontecer religioso y cultural más destacable de la Edad Media, hecho reconocido por el Parlamento Europeo, que designó al Camino como Primer Itinerario Cultural Europeo, y por la UNESCO, que lo declaró Patrimonio de la Humanidad. Pero además de meta de peregrinación incluso en la actualidad, Santiago es un centro turístico de primera magnitud. [23]

Los orígenes de la ciudad se remontan al hallazgo en el año 813 de la tumba del Apóstol Santiago. La primera basílica se construyó en el siglo IX y la actual Catedral es el resultado del paso de los siglos. En ella se resumen estilos como el románico, el gótico, el renacentista, el barroco y el neoclásico. Es uno de los monumentos más importantes de arte medieval español. [23]

Caminar por Santiago de Compostela supone descubrir infinidad de elementos culturales: palacios, monasterios, templos y plazas, pero también el espíritu de sus gentes acostumbradas a recibir viajeros de todos los caminos, la bulliciosa presencia de los miles de estudiantes de su Universidad, cinco veces centenaria, y disfrutar de la intensa oferta cultural que ofrece la ciudad. [23]

2.4 Identificación y valoración de impactos

Para identificar los impactos producidos por la planta de reformado con vapor de agua existen diferentes metodologías en función de la profundización, como por ejemplo listas de chequeo, matrices de causa efecto y diagramas de redes. El método más sencillo consiste en analizar una lista de chequeo de factores ambientales para detectar aquellos que pueden ser afectados o no por el desarrollo industrial, pudiendo clasificarlos en efectos ambientales significativos y no significativos. Un nivel más avanzado de profundización permite relacionar las acciones con los factores ambientales, indicando su causalidad y efecto. Además de ello, se puede realizar una valoración cuantitativa, además de la cualitativa antes mencionada. [8]

Para caracterizar los impactos ambientales en función de su daño al medio ambiente, se pueden considerar los siguientes aspectos en función de sus características: [24]

- **Signo.** Puede ser positivo o negativo y se refiere al carácter beneficioso o perjudicial del efecto al medio.
- **Inmediatez.** Un efecto directo o primario presenta una repercusión inmediata, mientras que un indirecto o secundario es el que deriva de un primario.
- **Acumulación.** Puede ser simple y manifestarse una única vez o ser acumulado y su gravedad depender de la intensidad de la acción que lo provoca.
- **Sinergia.** Puede presentar un efecto sinérgico o no en presencia de otros factores.
- **Momento.** El efecto puede producirse a corto, medio o largo plazo.
- **Persistencia.** Puede ser temporal o permanente a lo largo del tiempo.
- **Reversibilidad.** Un efecto reversible puede ser asimilado por los procesos naturales, mientras que uno irreversible no puede serlo.
- **Recuperabilidad.** Puede ser recuperable o eliminarse por una acción natural o humana o no.
- **Periodicidad.** El efecto se puede manifestar de forma cíclica o periódica o de forma impredecible en el tiempo, siendo necesario su evaluación en términos de probabilidad.
- **Continuidad.** Un efecto continuo es el que produce una alteración constante en el tiempo, mientras que el discontinuo lo hace de forma periódica o irregular. [24]

A continuación, se va a comentar con más detalle las emisiones contaminantes de la presente planta de reformador al medio y los factores ambientales perjudicados, así como su relación en una matriz de incidencia.

2.4.1 Matriz de incidencia

A continuación se aportan dos matrices causa-efecto de identificación de impactos, las cuales se corresponden a la fase de construcción y de explotación de la presente planta de reformado. [8]

Los impactos se clasifican en función de si son significativos o no y de su signo en el caso de que lo sean. En la Tabla 4 se recoge dicha clasificación.

Tabla 4. Simbología empleada en las matrices de incidencia

Impacto	Símbolo
Significativo y positivo	✓
Significativo y negativo	✗
No significativo	●

A continuación se muestran las matrices de incidencia para la fase de construcción (Tabla 5) y para la fase de operación normal de la planta (Tabla 6), donde se estudian diferentes acciones durante su transcurso.

Tabla 5. Matriz de incidencia en la fase de construcción. Fuente: basado en [8, 24]

Factores ambientales	Impactos	Movimiento de tierras	Movimiento de maquinaria	Ocupación del terreno por la planta	Pistas y accesos	Ocupación del terreno por materiales de la obra	Aporte de materiales de la construcción	Producción de residuos	Vertidos accidentales
Clima	Alteración del clima	●	●						
Calidad del aire	Cambio en el nivel de inmisión de partículas	✗					✗		
	Cambio en el nivel de inmisión de gases	✗	✗						
Hidrología y geología	Alteración del suelo	✗		✗	✗	✗		✗	✗
	Alteración de la calidad de las aguas	✗	✗					✗	✗
Flora y fauna	Alteración a la cubierta vegetal	✗			✗				
	Alteración de la fauna	●	●		●			✗	✗
	Alteración de los hábitats naturales	●			●			✗	✗
Paisaje	Alteración del paisaje	✗		●	●	✗			
Ruido	Alteración de los niveles sonoros	✗	✗				✗		
Medio socio-económico	Afección del patrimonio cultural								
	Afección de zonas de interés natural								
	Nivel de empleo	✓	✓		✓		✓		

Tabla 6. Matriz de incidencia en la fase de construcción. Fuente: basado en [8, 24]

Factores ambientales	Impactos	Funcionamiento de la planta	Emisiones líquidas	Emisiones sólidas	Emisión de gases	Generación de ruidos	Tráfico
Clima	Alteración del clima				●		
Calidad del aire	Cambio en el nivel de inmisión de partículas						
	Cambio en el nivel de inmisión de gases				✗		
Hidrología y geología	Alteración del suelo		●	●			
	Alteración de la calidad de las aguas		●	●			
Flora y fauna	Alteración a la cubierta vegetal				●		
	Alteración de la fauna				●	✗	✗
	Alteración de los hábitats naturales						
Paisaje	Alteración del paisaje	●					
Ruido	Alteración de los niveles sonoros	✗				✗	✗
Medio socio-económico	Afección del patrimonio cultural						
	Afección de zonas de interés natural						
	Nivel de empleo	✓					

2.4.2 Clima

En principio, el clima no se verá afectado por la presencia de la nueva planta de reformado, salvo por la generación de gases de efecto invernadero que a la larga contribuirán al calentamiento global.

En cualquier caso, el efecto climático a corto plazo es completamente insignificante.

2.4.3 Calidad del aire y emisiones gaseosas

Uno de los factores que más se va a ver perjudicado es la calidad del aire.

Durante la fase de construcción, acondicionamiento del terreo y transporte de materiales se van a emitir a la atmósfera principalmente gases de combustión procedentes de la maquinaria utilizada (óxidos de carbono, de nitrógeno y de azufre y compuestos orgánicos volátiles) y polvo y partículas procedente del manejo del terreno.

Las emisiones gaseosas se corresponden a la principal fuente de contaminantes producida durante la fase de operación debido a que tanto la materia prima como el producto obtenido están en fase gas. Estas emisiones gaseosas pueden tener diversos orígenes, siendo los principales los gases de combustión del reformador R-201 y las posibles purgas o fugas de las diferentes unidades.

Durante la fase de clausura los impactos ambientales son prácticamente idénticos a los de la fase de construcción.

Para controlar la calidad del aire durante la operación normal de operación de la planta de reformado con vapor de agua se puede emplear y ampliar las Redes de Vigilancia y Control de Calidad Atmosférica de las centrales termoelectricas As Pontes, Meirama y Sabón, donde la más cercana es la de Meirama. Estas redes están formadas por estaciones manuales y automáticas capaces de medir concentraciones de SO₂, partículas, NO_x y ozono. El número de estaciones que disponen dichas centrales se recogen en la Tabla 7. [25]

Tabla 7. Número de estaciones de control de calidad del aire de las centrales térmicas de Galicia. Fuente: [25]

Central térmica	Estaciones manuales	Estaciones automáticas
As Pontes	40	17
Meirama	4	8
Sabón	2	3

En la Figura 5 se muestra la localización de dichas estaciones de medida.

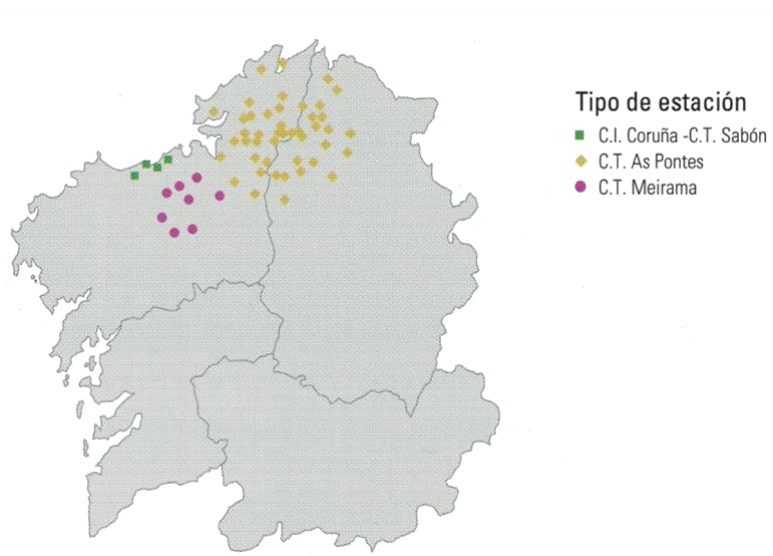


Figura 5 . Localización de las estaciones de medida correspondientes a las centrales térmicas de Galicia. Fuente: [25]

A continuación se analizan con más detalle las emisiones producidas por la operación normal de la presente planta de reformado con vapor de gas natural.

Las principales fuentes emisoras de gases contaminantes de forma continua son los gases de combustión del reformador R-101.

Por otro lado, el CO₂ separado de la corriente de proceso y obtenido en la columna de desorción C-302 podría suponer un problema de contaminación atmosférica. Sin embargo, debido a que se retiene para su posterior almacenamiento, no es necesario considerarlo como efluente.

De forma similar, los gases obtenidos en la columna C-102, los cuales están formados por H₂S principalmente, se envían a una unidad Claus para su posterior transformación en azufre sólido.

En consecuencia, las principales emisiones son debidas a los gases de combustión, los cuales provienen de la quema conjunta de gas natural y de los gases residuales procedentes del sistema de purificación PSA.

En la Tabla 8 se recogen las emisiones típicas de una planta de reformado de vapor.

Tabla 8. Niveles de emisión típicos de una planta de reformado con vapor. Fuente: [7, 26]

Compuesto	Niveles de emisión
NO ₂	200-400 mg/Nm ³
SO ₂	< 0,5 mg/Nm ³
CO	< 10 mg/Nm ³
CO ₂	900 kg/1000 Nm ³ H ₂

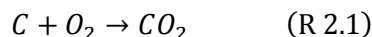
Los niveles reales de emisión de CO₂ de la presente planta son menores debido a la recuperación de dicho gas en la sección de purificación.

Para el caso del dióxido de nitrógeno, sus niveles de emisión para plantas nuevas que cumplan con los requisitos de MTD deben estar entre 70-230 mg/Nm³. [7]

Los compuestos presentes en dichos gases residuales se describen en los apartados adyacentes.

2.4.3.1 Dióxido de carbono

Es un gas incoloro con un ligero olor acre y gusto ácido. Su principal fuente es la combustión completa de hidrocarburos: [27]



Por ello, es el componente mayoritario en las emisiones gaseosas producidas.

Este gas no es considerado como perjudicial pero sus altas concentraciones pueden producir asfixia. [27]

El mayor problema que presenta al medio ambiente es que es un gas de efecto invernadero. Debido al aumento de sus emisiones por fuentes antropomórficas en los últimos siglos, se está produciendo el llamado cambio climático, el cual consiste en un aumento progresivo de la temperatura de la atmósfera. [27]

2.4.3.2 Monóxido de carbono

Es un gas incoloro, inodoro e insípido, su densidad es el 96,5 % de la del aire y es muy poco soluble en agua. En términos de masa es el contaminante más abundante y ampliamente distribuido. [28]

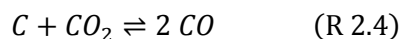
Su principal causa es una mala combustión de compuestos formados por carbono. A continuación se detallan los posibles mecanismos de formación relacionados con un proceso de combustión: [28]

- **Combustión incompleta de compuestos que contengan carbono:** La reacción de combustión de compuestos con carbono transcurre en dos etapas:

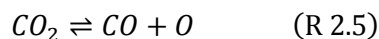


Donde la primera reacción presenta una velocidad mayor que la segunda, lo que implica que si la proporción de oxígeno es pequeña o no hay mezcla eficaz, tiene lugar una emisión de CO elevada. La forma de evitarlo es trabajar con relaciones altas de oxígeno.

- **Reacción entre el CO₂ formado en la combustión y el carbono del combustible aún sin quemar:** Esta reacción tiene importancia a temperaturas elevadas, como por ejemplo las alcanzadas dentro del reformador R-201. La reacción correspondiente es:



- **Disociación del CO₂ a altas temperaturas:** Cuando se trabaja a altas temperaturas se desprende CO incluso cuando haya suficiente oxígeno para la combustión completa y las condiciones de mezcla sean buenas. Esto se debe a que la constante de equilibrio del proceso de descomposición del CO₂ aumenta con la temperatura. La reacción que tiene lugar es:



Los efectos perjudiciales del CO sobre el medio ambiente son muy elevados. En concreto, su mayor daño es sobre aquellos animales que tienen sistemas respiratorios en los que la hemoglobina actúa como agente transportador de oxígeno. [28]

2.4.3.3 Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno que se pueden dar son: [28]

- **Monóxido de nitrógeno (NO):** Gas incoloro, tóxico e interviene en procesos fotoquímicos troposféricos formando un equilibrio con NO₂.
- **Dióxido de nitrógeno (NO₂):** Gas pardo-rojizo, tóxico y que interviene en los procesos fotoquímicos troposféricos.

Ambos son debidos a un proceso de combustión a altas temperaturas a partir del nitrógeno del aire: [28]

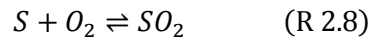


A parte de su toxicidad, otros problemas debidos a los óxidos de nitrógeno son el llamado *smog* fotoquímico y las lluvias ácidas. [28]

2.4.3.4 Óxidos de azufre

Los óxidos de azufre emitidos a la atmósfera son el dióxido (SO₂) y el trióxido (SO₃), donde el primero se produce en mucha más cantidad. Ambos son gases incoloros, teniendo el SO₂ un color acre en concentraciones superiores a 3 ppm. [28]

Estos se producen en la combustión de cualquier sustancia que contenga azufre. El mecanismo simplificado de formación de ambos óxidos implica las siguientes reacciones: [28]



A temperaturas elevadas el SO_3 es muy inestable desplazando el equilibrio hacia la formación de SO_2 con lo que prácticamente todos los óxidos de azufre emitidos estarán formados por el dióxido. [28]

Los principales problemas del SO_2 son las lluvias ácidas y sus efectos nocivos para animales, plantas y corrosión. [28]

2.4.3.5 Partículas

Las partículas de sólidos pueden suponer problemas ambientales pero, debido a que el presente proceso se trabaja con gases libres de partículas, este tipo de contaminación no se considera.

2.4.3.6 Hidrocarburos volátiles

El metano, que constituye el principal componente del gas natural, es un causante del efecto invernadero más potente que el CO_2 , aunque las moléculas de metano tienen un tiempo de vida en la atmósfera más corto que el del CO_2 . De acuerdo con estudios independientes, las pérdidas directas de gas natural durante la extracción, transporte y distribución a nivel mundial, se han estimado en 1% del total del gas transportado. [29]

Muchos hidrocarburos volátiles presentan el problema de que pueden transformarse en los llamados oxidantes fotoquímicos, causantes de efectos mucho más graves que los causados por los propios hidrocarburos. Esta reacción tiene lugar en presencia del monóxido de nitrógeno, creando el antes mencionado *smog* fotoquímico. [28]

Por otro lado, la presente planta de reformado presenta una serie de emisiones eventuales producidas durante la operación normal, las cuales tienen dos causas principales:

- Emisiones accidentales producidas por fugas o malos sellados en las diferentes unidades. En concreto, el mayor riesgo de que puedan darse es en elementos de unión como bridas.

- Venteos de válvulas de alivio por motivos de seguridad ante la existencia de presiones excesivas en equipos.

En ambos casos, los gases expulsados estarán formados por las especies que intervienen en el proceso productivo. Éstas pueden ser: sulfuro de hidrógeno, metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno, vapor de agua y nitrógeno.

De todas estas sustancias las únicas no peligrosas son el vapor de agua y el nitrógeno, ambas presentes en la atmósfera de forma natural. Las demás, las cuales si presentan algún tipo de problema ambiental, ya fueron descritas anteriormente, salvo el hidrógeno y el sulfuro de hidrógeno.

El principal problema del hidrógeno, gas incoloro, inodoro y no venenoso, es que puede crear una atmósfera explosiva con riesgo de incendio o explosión, con su posible daño colateral al medio. [30]

Por otro lado, el H_2S también es un gas incoloro e inflamable, además de ser tóxico. Es capaz de producir una muerte rápidamente después de su inhalación. Su toxicidad es comparable a la de un cianuro. En contacto con el agua, se vuelve corrosivo. Por todo ello, es un gas muy peligroso que no debe llegar al medio ambiente. [31]

2.4.4 Calidad de las aguas y emisiones líquidas

La calidad de las aguas de la zona puede verse perjudicada por diferentes fuentes contaminantes.

Dentro de la fase de construcción es habitual generar aguas residuales procedentes del lavado de la maquinaria, excavaciones e incluso el agua de lluvia, la cual puede producir lixiviados.

Las emisiones líquidas de la planta durante la fase de operación se pueden deber a diferentes causas. Como fuentes de residuos líquidos se pueden considerar:

- **Aguas sanitarias procedentes de las oficinas y otros edificios auxiliares:** Se enviarán al sistema de alcantarillado para su posterior tratamiento junto con aguas residuales urbanas.
- **Agua de limpieza o lavado:** Se dispondrá un sistema de recogida del agua para su posterior tratamiento.

- **Agua de lluvia:** Debido a su carácter no peligroso se dispone de un sistema de drenaje de la planta para evitar su acumulación.
- **Pérdidas de condensados del sistema de utilidades:** Para evitar que se produzcan se procede a mejorar los sistemas de sellado y de unión de tuberías y equipos.
- **Pérdidas de las corrientes líquidas de los sistemas de absorción con aminas (columnas C-101, C-102, C-301 y C-302):** Es la emisión líquida que presenta mayor problema desde el punto de vista ambiental debido a su contenido en aminas y CO₂ y/o H₂S. debido a la presencia de estos compuestos es una emisión extremadamente corrosiva y peligrosa para el medio ambiente. Se debe garantizar que no haya fugas mejorando el sistema de sellado de dichas unidades y, en caso de que existan, emplear el sistema de tratamiento adecuado.

Por otro lado, todo el condensado producido en el correspondiente separador (S-301) es recirculado para su aprovechamiento con el vapor alimentado al proceso, con lo que no se consideran como agua residual.

Por último, en la fase de clausura, las emisiones producidas son similares a las de la fase de construcción.

2.4.5 Calidad del suelo y emisiones sólidas

Para albergar la nueva planta de reformado es necesario realizar una ocupación del terreno. Aún así, gracias a que se elige un polígono industrial, el suelo ocupado ya está destinado a tal fin minimizando el daño al medio.

La contaminación del suelo puede deberse, en primer lugar, a los sólidos generados durante la fase de construcción, los cuales son formados por escombros procedentes del acondicionamiento del suelo o de cualquier otra índole. En cualquier caso, se debe gestionar adecuadamente su limpieza o recogida.

Por otro lado, los residuos sólidos generados durante la operación normal en la planta son mínimos, siendo sus principales causas las oficinas y otros edificios y el manejo de los catalizadores.

Los residuos generados por el personal en sus puestos de trabajo serán gestionados por la red de recogida de residuos urbanos debido a su similitud.

Los catalizadores sólidos de los reactores y los lechos adsorbentes del PSA deben ser repuestos cada cierto tiempo ya que se desactivan perdiendo sus propiedades. En consecuencia,

se debe gestionar su recogida y posterior tratamiento para evitar que supongan un peligro para el medio ambiente. Aún así, existe la posibilidad de que se produzcan pérdidas en los momentos de descarga del sólido usado y carga del nuevo. Por ello, se debe prestar especial atención en cumplir los procedimientos de carga y descarga para minimizar dichas pérdidas y posteriormente proceder a su recogida en el caso de que ocurran.

Para una planta típica de reformado, las pérdidas de catalizador sólido se recogen en la Tabla 9.

Tabla 9. Pérdidas de masa de catalizador de diferentes equipos por cada 265 t H₂/día en una planta típica de reformado de gas natural con vapor de agua. Fuente: [7]

Equipo	Pérdidas
Reformador	5 m ³ /año
HTS	10 m ³ /año
LTS	10 m ³ /año

Por último, durante la fase de clausura los impactos ambientales son prácticamente idénticos a los de la fase de construcción.

2.4.6 Flora y fauna

La flora y fauna colindante al terreno donde se sitúa la planta podría sufrir daños colaterales por su presencia, pero al encontrarse en un polígono creado para albergar todo tipo de industria, ya se han tomado las consideraciones pertinentes respecto a estas cuestiones en su construcción.

La vegetación se va a ver afectada en parte, debido a la previa deforestación en dicho proceso de construcción del polígono y al aumento de las emisiones gaseosas.

Por otro lado, la fauna local puede presentar mayores problemas debido al aumento del ruido y del tráfico por la presencia de la nueva planta, produciendo su alejamiento a otras zonas más tranquilas e incluso aumentando el riesgo de atropello.

2.4.7 Paisaje

El paisaje se verá afectado en cierta medida por la presencia de una nueva planta en el polígono de A Sionlla. Aún así, debido al carácter industrial de dicho emplazamiento el impacto visual es reducido, siendo disimulado por la presencia de otras naves industriales.

2.4.8 Ruido

Durante la fase de construcción de la planta y posteriormente en la clausura se genera ruido procedente de la maquinaria empleada para tal fin.

Así mismo, en la fase de operación también es generado debido a diferentes fuentes como elementos de impulsión (bombas y compresores) y otros más distintos como antorchas durante su funcionamiento.

Por ello, es necesario emplear las medidas pertinentes para evitar superar los niveles sonoros impuestos por el Anexo III del Real decreto 1367/2007 del 19 de octubre mencionado con anterioridad, para evitar esta contaminación acústica.

2.4.9 Medio socio-económico

A continuación se va hablar del impacto de la presente planta de reformado al medio socio-económico.

En la inauguración del parque empresarial de A Sionlla en diciembre del 2012 el Presidente de la Xunta, Alberto Núñez Feijóo, indicó que se trataba de “la mayor superficie empresarial desarrollada por la Xunta en 30 años”. Este complejo puede acoger a 200 empresas y crear 8.000 puestos de trabajo. El Presidente de la Xunta ha señalado, asimismo, que con más de 74 millones de euros de inversión, el parque empresarial se convierte en "la prueba más clara del compromiso" de la Xunta con Santiago para su recuperación económica. [32]

Por ello, situar la planta de reformado de gas natural en esta ubicación ayudará a esta recuperación económica impulsando el sector energético con la producción de hidrógeno a gran escala y proporcionando nuevos puestos de trabajo.

2.5 Medidas para la minimización del impacto

Una vez determinados los impactos producidos por la planta de reformado, es necesario definir las medidas ambientales para prevenir, corregir o eliminar dichos impactos.

A continuación se listan una serie de acciones con tal fin para cada uno de los factores ambientales afectados: [33]

- **Atmósfera:**
 - Programas de vigilancia y de control de la calidad del aire.
 - Establecimientos de Redes de Vigilancia de la calidad del aire.
 - Evaluaciones preventivas de impacto ambiental.
 - Tecnologías de baja y nula emisión de residuos.
 - Bioensayos (inspección y evaluación de daños en vegetales establecidos o específicos, como líquenes sensibles a impurezas, sobre todo al SO₂).
 - Instalación de chimeneas adecuadas, de tal forma que la dilución sea suficiente para evitar concentraciones elevadas a nivel de suelo.
 - Concentrar y retener los contaminantes en equipos adecuados de depuración (filtros especiales...).
 - Mejora y optimización de los procesos de combustión y empleo de quemadores de baja producción de NO_x.
 - Empleo de antorchas para la quema controlada de venteos.
 - Mapas acústicos urbano e interurbano, que identifiquen y evalúen los focos sonoros que den lugar a altos niveles de ruido, los puntos concretos más sensibles al ruido y una distribución de niveles de molestia para cada zona de entorno.
- **Suelo:**
 - Prevención de inundaciones.
 - Prácticas de drenaje.
 - Repoblaciones forestales.
 - Desbroces y limpiezas del terreno a gran escala.
 - Medidas compensatorias a la pérdida de suelo.
 - Empleo de cubetos y otros sistemas de contención en caso de fuga o rotura de equipos.
- **Agua:**
 - Reducción del volumen de vertidos y de su capa contaminante.
 - Recirculación de aguas usadas.
 - Recuperación de subproductos.

- Eliminación de vertidos accidentales y descargas bruscas.
- Implantación de instalaciones de tratamiento de vertidos.
- Eliminación de aguas residuales sin recurrir a su tratamiento mediante el empleo de dilución, concentración (y posterior consideración como residuo susceptible de transporte), inyección en el terreno o aplicación al suelo.
- Impermeabilización del suelo.
- Control de la inyección de aguas residuales en el subsuelo.
- Vegetación:
 - Protección contra la contaminación atmosférica.
 - Conservación y reconstrucción de suelos.
 - Protección contra incendios.
 - Planes y disposiciones de protección de la cubierta vegetal, que disminuyen el riesgo de desertización.
- Fauna:
 - Planes de protección y conservación de la fauna.
 - Protección contra la contaminación atmosférica y de las aguas.
 - Protección contra incendios.
 - Construcción de pasos para eliminar el efecto barrera.
- Paisaje:
 - Adaptar las formas al medio.
 - Estructuras que provoquen el mínimo corte visual.
 - Respetar la tipología constructiva de la zona.
 - Interposición de pantallas para ocultar elementos no integrados en el paisaje.
- Población:
 - Buena planificación y gestión de recursos.
 - Incrementar la seguridad vial.
 - Potenciar los equipamientos sociales.
 - Política administrativa que evite la degradación de determinadas zonas rurales o urbanas.
 - Políticas administrativas encaminadas a potenciar la creación de nuevos puestos de trabajo. [33]

2.6 Programa de Vigilancia Ambiental

Para la presente planta de reformado de gas natural con vapor de agua es necesario realizar un Programa de Vigilancia Ambiental, donde se realiza un seguimiento y control de las acciones ambientales durante la fase de construcción y la de operación.

Según la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, en su Anexo VI apartado 7, el Programa de Vigilancia Ambiental debe establecer un sistema que garantice el cumplimiento de las indicaciones y medidas preventivas, correctoras y compensatorias contenidas en el estudio de impacto ambiental tanto en la fase de ejecución como en la de explotación. Este programa atenderá a la vigilancia durante la fase de obras y al seguimiento durante la fase de explotación del proyecto.

Los objetivos básicos incluidos en la Ley 21/2013 son los siguientes:

- Vigilancia ambiental durante la fase de obras:
 - Detectar y corregir desviaciones, con relevancia ambiental, respecto a lo proyectado en el proyecto de construcción.
 - Supervisar la correcta ejecución de las medidas ambientales.
 - Determinar la necesidad de suprimir, modificar o introducir nuevas medidas.
 - Seguimiento de la evolución de los elementos ambientales relevantes.
 - Alimentar futuros estudios de impacto ambiental.
- Seguimiento ambiental durante la fase de explotación. El estudio de impacto ambiental debe justificar la extensión temporal de esta fase considerando la relevancia ambiental de los efectos adversos previstos.
 - Verificar la correcta evolución de las medidas aplicadas en la fase de obras.
 - Seguimiento de la respuesta y evolución ambiental del entorno a la implantación de la actividad.
 - Alimentar futuros estudios de impacto ambiental.

El Programa de Vigilancia Ambiental debe informar al Órgano administrativo responsable de los aspectos ambientales de la actividad y del medio que son objeto de seguimiento, ofreciendo a dicho Órgano la metodología idónea para efectuarlo y trasladar los datos obtenidos a la metodología general de valoración con el fin de comparar los impactos positivos de las mejoras correctoras, con los previstos en el estudio de impacto ambiental llevado a cabo. [33]

Además, el Programa de Vigilancia Ambiental presenta otros objetivos generales, los cuales son los siguientes: [33]

- Controlar la correcta ejecución de las medidas protectoras y correctoras previstas.
- Verificar los estándares de calidad de materiales y medios empleados en las actuaciones proyectadas de índole ambiental.
- Comprobar la eficacia de las medidas protectoras y correctoras establecidas y ejecutadas. Cuando tal eficacia se considere insatisfactoria, determinar las causas y establecer los remedios adecuados.
- Detectar impactos no previstos y proponer las medidas adecuadas para reducirlos, eliminarlos o compensarlos.
- Informar de manera sistemática a las autoridades implicadas sobre los aspectos objeto de vigilancia y ofrecer un método sistemático, lo más sencillo y económico posible, para realizar la vigilancia de una forma eficaz.
- Describir el tipo de informes y la frecuencia y periodo de su emisión y a quien van dirigidos.

Para conseguir estos objetivos se debe describir con el suficiente grado de detalle el seguimiento que se va a hacer de las medidas correctoras y de los factores del medio ambiente. Se deben especificar los plazos estipulados para su realización, la frecuencia de controles, el entorno a controlar, los métodos a utilizar, el equipo humano implicado, los equipos de medida, entre otros. [33]

Los principales puntos objeto de vigilancia son, entre otros: [33]

- Introducción correcta y grado de eficacia de las medidas precautorias, protectoras, correctoras y compensatorias.
- Medida de los impactos residuales cuya total corrección no sea posible y comparándolos con los previstos anteriormente.
- Medida de otros impactos no previstos y de posterior aparición a la ejecución del proyecto, sean consecuencia o no de las acciones correctoras.

Algunos de los aspectos controlados y vigilados pueden ser: [33]

- Localización de préstamos y vertederos.
- Los trabajos de retirada, acopio y mantenimiento de la tierra vegetal.
- Operaciones de movimiento de tierras.
- Orden, limpieza y acabado final de las obras.
- La aparición y tratamiento de suelos contaminados por vertidos.

- La calidad de los suelos y de las aguas.
- Los procedimientos de tratamiento y gestión de residuos.
- Las emisiones a la atmósfera.
- Emisiones acústicas.
- Seguimiento de las medidas correctoras o de mejora durante la fase de explotación.

Para el buen funcionamiento del Programa de Vigilancia Ambiental se debe sistematizar, explicando para cada actuación los objetivos, los indicadores utilizados, los umbrales de alerta considerados y las inspecciones a llevar a cabo detalladas (metodología, lugares y periodicidad). [33]

Los documentos que debe incluir el Programa de Vigilancia Ambiental según la Ley 21/2013 son los siguientes:

- **Archivos de medios materiales.** En ellos se recoge todo la documentación relativa a los medios materiales empelados en el programa y el inventario realizado durante el estudio, además de documentos técnicos y garantías de equipos.
- **Diario de seguimiento ambiental.** En este documento se reflejan todas las observaciones realizadas en relación a la normativa vigente, así como las acciones realizadas y posibles incidencias. Además de ello, es de libre acceso a las autoridades que lo soliciten.
- **Informes periódicos.** En ellos realiza un resumen sobre las observaciones y resultados obtenidos informando del estado de las diferentes mediciones realizadas y de las medidas a adoptar en el caso de anomalías.
- **Informe anual de medidas correctoras.** En este documento se refleja la eficacia y el grado de implantación de las medidas correctoras, así como la posibilidad de tener que incluir otras nuevas en caso de anomalía.

2.7 Resumen del proyecto y conclusiones

El estudio de impacto ambiental de la presente planta de reformado de gas natural con vapor de agua tiene como objetivo determinar los posibles daños al medio producidos por la misma, tanto en su fase de construcción como posteriormente durante su operación normal.

Asimismo, también se incluye información del estado del medio previo a la construcción de la planta, la descripción del proceso y un estudio de las posibles alternativas al mismo.

Una vez conocido el inventario ambiental previo a la construcción de la planta y sus impactos posteriores se procede a su valoración y a la definición de medidas correctoras que sean capaces de eliminar o minimizar estos problemas ambientales al mismo tiempo que se realiza un programa de vigilancia ambiental.

A modo de conclusión, se puede destacar que el principal problema medioambiental que la presente planta va a generar es la emisión de gases de combustión contaminantes. Aún así, gracias a la retención del CO₂ producido como subproducto en el proceso se reducen notablemente las emisiones totales.

Como impacto positivo, se destaca la creación de empleo y el desarrollo económico de la comarca de Santiago de Compostela que la presente planta produciría, así como la impulsión de la producción del hidrógeno en Galicia y en España garantizando una futura economía basada en él.

3. BIBLIOGRAFÍA

Además de la legislación recogida en el presente Estudio Básico de Seguridad y Salud y en la Memoria, en el apartado correspondiente a la Normativa de aplicación, se ha consultado la bibliografía que se muestra a continuación.

[1] INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. *Guía técnica para la evaluación y prevención de riesgos relativos a las obras de construcción* [pdf en línea]. Ministerio de Empleo y Seguridad Social, Gobierno de España [consultado el 10 de junio de 2016]. Disponible en:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Normativa/GuiasTecnicas/Ficheros/g_obras.pdf

[2] COLEGIO OFICIAL DE APAREJADORES Y ARQUITECTOS TÉCNICOS DE MADRID. *Manual práctico de seguridad y salud en la construcción* [pdf en línea]. Instituto Regional de Seguridad y Salud en el Trabajo, Consejería de Empleo y Mujer, Comunidad de Madrid [consultado el 10 de junio de 2016]. Disponible en:

http://www.joca.es/docs/MANUAL_PRACTICO_DE_SEGURIDAD_Y_SALUD_EN_LA_CONSTRUCCION.pdf

[3] INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. *Equipos de Protección Individual (EPI) y colectiva* [sitio web]. Ministerio de Empleo y Seguridad Social, Gobierno de España [consultado el 10 de junio de 2016]. Disponible en:

<http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.1f1a3bc79ab34c578c2e8884060961ca/?vgnextoid=70ab69d0d3819110VgnVCM1000000705350aRCRD&vgnnextchannel=1d19bf04b6a03110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>

[4] INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. *Guía orientativa para la selección y utilización de EPI contra caídas de altura* [sitio web]. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Gobierno de España [consultado el 12 de junio de 2016]. Disponible en:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Guias/Guias_Orientativas_EPI/Ficheros/caidas_de_altura.pdf

[5] INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. *Enciclopedia de Seguridad y Salud en el Trabajo de la Organización Internacional del Trabajo* [sitio web]. Publicaciones del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Madrid, 2001 [consultado el 12 de junio de 2016]. Disponible en:

<http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.1f1a3bc79ab34c578c2e8884060961ca/?vgnextoid=a981ceffc39a5110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD&vgnnextchannel=9f164a7f8a651110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>

[6] ZECSA. Informe de mercado: Hidrógeno [pdf en línea]. DYNA, Industria a Ingeniería. Las Palmas de Gran Canaria [consultado el 10 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.revistadyna.com/noticias-de-ingenieria/informe-de-mercado-hidrogeno-zecsa>

[7] COMISIÓN EUROPEA. Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals – Ammonia, Acids and Fertilisers [pdf en línea]. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España [consultado el 12 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/documentos/documentos-mejores-tecnicas-disponibles>

[8] GARMENDIA SALVADOR, A., SALVADOR ALCAIDE, A., CRESPO SÁNCHEZ, C., GARMENDIA SALVADOR, L., *Evaluación de impacto ambiental*, 1ª edición (España): Pearson-Prentice Hall, 2006. ISBN 84-205-4398-5

[9] INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA, *Provincia de La Coruña: Mapa geocientífico del medio natural*, 1ª edición (Madrid): Xunta de Galicia, 1984. ISBN 84-7474-249-8

[10] MARTÍNEZ CORTIZAS, A., PÉREZ ALBERTI, A., *Atlas Climático de Galicia*, 1ª edición (Santiago de Compostela): Xunta de Galicia, 1999. ISBN 84-453-2611-2

[11] METEOGALICIA, *Informe anual da calidade do aire de Galicia 2014* [pdf en línea]. Consellería de medio ambiente, territorio e infraestruturas. Xunta de Galicia [consultado el 15 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.meteogalicia.es/Caire/informesCaire.action;jsessionid=4EB0DEC65654D5164B9D07E5C0F41CB3.EUME-01C>

[12] CONCELLO DE SANTIAGO. *Entorno- Climatología, Relieve, Geología, Fauna, Flora* [sitio web] [consultado el 16 de mayo de 2016]. Disponible en: http://www.santiagodecompostela.gal/turismo/interior.php?txt=t_contorno&lg=cas

[13] DIAZ-FIERROS T., F., SUAREZ, J., PUERTA, J., DÍAZ-FIERROS V., F. Influencia de las aguas subterráneas sobre la infiltración de aguas parásitas en la red de saneamiento de Santiago de Compostela. En: SAMPER J. et al. *Las aguas subterráneas en el noreste de la Península Ibérica: Asociación Internacional de Hidrogeólogos - Grupo Español*, 2000, 261-267. ISBN 84-7840-418-X

[14] GUÍAS MASMAR. *Río Sar: El río de Compostela. A Coruña* [sitio web] [consultado el 16 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://guias.masmar.net/R%C3%ADos-y-Lagos/Galicia/R%C3%ADo-Sar-El-r%C3%ADo-de-Compostela.-A-CORU%C3%91A>

[15] XESTIÓN DO SOLO DE GALICIA, XESTUR. *Plano interactivo do parque: P.E. 223-A Sionlla* [sitio web] [consultado el 5 de mayo de 2016]. Disponible en: http://www.xesturgalicia.com/index.php?seccion=solo_empresarial&opcion=fichape&id=223

[16] INGESTIN REAL ESTATE. *Parque empresarial de A Sionlla. Santiago de Compostela* [sitio web] [consultado el 5 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.ingestin.com/parque-empresarial-de-sionlla-santiago-de-compostela/>

[17] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. *Nomenclátor: Población del Padrón Continuo por Unidad Poblacional a 1 de enero* [sitio web] [consultado el 18 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaRapida&subaccion=&numPag=0&ordenAnios=ASC&nombrePoblacion=santiago+de+compostela&botonBusquedaRapida=Consultar+selecci%C3%B3n>

[18] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. *Población residente por fecha, sexo y edad* [sitio web] [consultado el 18 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=9687>

[19] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. *Distribución porcentual de los activos por sector económico y provincia* [sitio web] [consultado el 18 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=3994>

[20] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. *Tasas de actividad, paro y empleo por provincia* [sitio web] [consultado el 18 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=3996>

[21] CONCELLO DE SANTIAGO. *Suelo industrial* [sitio web] [consultado el 18 de mayo de 2016]. Disponible en: http://santiagodecompostela.gal/facendo_cidade/facendo.php?txt=fc_solo&lg=cas

[22] SANTIAGO, X. R. *Tres nuevas empresas compran suelo en el polígono de A Sionlla* [en línea]. La Voz de Galicia [publicado el 10 de mayo de 2015] [consultado el 18 de mayo de 2016]. Disponible en: http://www.lavozdeg Galicia.es/noticia/santiago/2015/05/10/tres-nuevas-empresas-compran-suelo-poligono-sionlla/0003_201505S10C19911.htm

[23] UNESCO ESPAÑA. *Ciudades Patrimonio de la Humanidad – Santiago de Compostela* [sitio web] [consultado el 19 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.ciudadespatrimonio.org/ciudades/index.php?cd=10>

[24] GÓMEZ OREA, D. *Evaluación del Impacto Ambiental*, 1ª edición (Madrid): Mundi-Prensa/Ed. Agrícola Española (coedición), 1999. ISBN 84-7114-814-5/84-85441-51-6

[25] CASARES LONG, J. J., ROCA BORDELLO, E., BELLO BUGALLO, P. M., *Prevención da contaminación no sector enerxético, centrais térmicas*, 1ª edición (Santiago de Compostela): Consellería de Medio Ambiente, Centro de Desenvolvemento Sostible, 2002. ISBN 84-453-3342-9

[26] WINTER-MADSEN, S., OLSSON, H. *Steam reforming solutions* [pdf en línea]. Hydrocarbon Engineering [consultado el 25 de mayo de 2016]. Disponible en: http://www.topsoe.com/sites/default/files/topsoe_steam_reform_solutions.ashx_3.pdf

[27] KIRK, R. E., *Encyclopedia of chemical technology*, Volumen 5, 4ª edición (EE. UU.): Wiley Interscience, 1993. ISBN 0-471-52673-8

[28] OROZCO BARRENETXEA, C., PÉREZ SERRANO, A., GONZÁLEZ DELGADO, M. N., RODRÍGUEZ VIDAL, F. J., ALFAYATE BLANCO, J. M. *Contaminación ambiental, Una visión desde la química*, 1ª edición (Madrid): Thomson, 2005. ISBN 84-9732-178-2

[29] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. GOBIERNO DE ESPAÑA. *El Gas Natural – Información sobre el gas natural* [sitio web] [consultado el 26 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.minetur.gob.es/ENERGIA/GAS/GAS/Paginas/gasnatural.aspx>

[30] ELVERS, B., HAWKINS, S., RAVENSCROFT, M., SCHULZ, G. *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, volumen A 13, 5ª edición, Weinheim (Alemania): VCH, 1989. ISBN 3-527-20113-0

[31] MCKETTA J. J., *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*, volumen 27, EE. UU.: Dekker, 1988. ISBN 0-8247-2477-1

[32] ED ECONOMÍA DIGITAL. *E polígono de A Sionlla, en Santiago, podría crear 8.000 empregos* [sitio web] [publicado el 21 de noviembre de 2012] [consultado el 18 de mayo de 2016]. Disponible en: http://www.economiadigital.es/gles/notices/2012/11/el_poligonos_de_a_sionlla_en_santiago_p_odria_crear_8.000_empleos_27578.php

[33] CONESA FERNANDEZ-VÍTORA, V., *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*, 4ª edición (Madrid): Mundi-Prensa, 2010. ISBN 978-84-8476-384-0

Planta de Producción de Hidrógeno por
Reformado de Gas Natural

DOCUMENTO IV.

PLIEGO DE CONDICIONES

Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

Universidade de Santiago de Compostela

Escola Técnica Superior de Enxeñaría

Julio 2016

Alejandro Ferraces Azcunaga | Óscar López Gestoso

INDICE

1. DISPOSICIONES GENERALES.....	5
1.1 Objeto de este pliego.....	5
1.2 Concurso	5
1.3 Contrato.....	6
1.4 Programa	8
1.5 Estudios y documentación técnica	9
1.6 Pliegos, instrucciones y normas aplicables	11
1.7 Seguridad y accidentes laborales.....	11
2. CALIDAD DE LOS MATERIALES	12
2.1 Consideraciones generales	12
2.2 Aceros	13
2.3 Resto de materiales	13
3. NORMAS DE CÁLCULO	14
4. DISPOSICIONES GENERALES DE LAS OBRAS.....	14
4.1 Replanteo de la obra.....	14
4.2 Plazo de ejecución.....	15
4.3 Mano de obra.....	15
4.4 Reforma del proyecto.....	17
4.5 Contrataciones, omisiones o errores en los documentos	17
4.6 Trabajos defectuosos o no autorizados.....	18
4.7 Suspensión de las obras.....	19
4.8 Seguros.....	20
5. ENSAYOS, PRUEBAS Y PROTECCIONES.....	20

5.1 Ensayos en taller	20
5.2 Presentación en taller	21
5.3 Protección contra la corrosión.....	21
6. FABRICACIÓN, MONTAJE, RECEPCIÓN Y GARANTÍAS	22
6.1 Inspección fabril.....	22
6.2 Montaje e inspección.....	22
6.3 Controles	23
6.3.1 Cambiadores de calor	24
6.3.2 Tuberías.....	24
6.3.3 Columnas y depósitos a presión	24
6.3.4 Bombas.....	25
6.3.5 Prueba hidráulica en taller.....	25
6.4 Acta de fin de montaje	25
6.5 Ajustes, ensayos y servicio experimental.....	25
6.6 Recepción provisional	26
6.7 Periodo de garantía.....	27
6.8 Recepción definitiva.....	27
7. ALMACENAMIENTO, SEGUROS Y TRANSPORTE.....	28
7.1 Almacenamiento	28
7.2 Transporte	29
7.3 Seguros.....	29
7.4 Importación de materiales y equipos.....	30
8. ORGANIZACIÓN DE LAS OBRAS.....	30
8.1 Dirección de las obras y representación del Adjudicatario	30

8.2	Terrenos necesarios para la ejecución de las obras	32
8.3	Instalaciones auxiliares	32
8.4	Relaciones entre la Propiedad y los diversos contratistas	34
8.5	Subcontratación de obras	35
8.6	Personal de montaje	36
8.7	Seguros y asistencia médica.....	36
9.	CONDICIONES DE PAGO Y LEGISLACIÓN	37
9.1	Definición de precios	37
9.2	Prestaciones accesorias y trabajos por administración.....	38
9.3	Trabajos no previstos	39
9.4	Revisión de precios	40
9.5	Condiciones de pago	41
9.6	Penalizaciones	42
9.7	Indemnizaciones a favor del Adjudicatario.....	42
9.8	Cese o aplazamiento de los trabajos, rescisión del contrato.....	43
9.9	Legislación	45

1. DISPOSICIONES GENERALES

1.1 Objeto de este pliego

El presente Pliego de Condiciones constituye el conjunto de instrucciones, normas, prescripciones y especificaciones que, junto con lo indicado en la Memoria, Planos y Presupuestos, definen todos los requerimientos a cumplir por las obras.

Se incluye la descripción general de las obras, las condiciones que deben cumplir los materiales y las instrucciones para la ejecución, medición y abono de las unidades de dichas obras, siendo por tanto la normal guía que ha de seguir en todo momento al adjudicatario.

1.2 Concurso

El propietario de este proyecto se reserva el derecho a introducir modificaciones de detalle o de exigir la prestación de servicios suplementarios que el Adjudicatario pueda realizar.

El Adjudicatario podrá proponer modificaciones de las especificaciones de suministro, debiendo de hacerlo siempre que, por efecto de la utilización de patentes o por otras razones, lo crea técnica y económicamente aconsejable.

Las especificaciones y las descripciones del suministro no son limitativas, debiendo el Adjudicatario facilitar todos los datos e información que estime indispensable para conseguir plenamente los fines del contrato.

El Adjudicatario dará preferencia, en igualdad de condiciones, a materiales y servicios de origen español.

Los Concursantes deberán presentar un Cuadro de Precios Unitarios. Presentarán asimismo los Presupuestos Parciales y Generales correspondientes y una descripción de la organización de sus trabajos, en la que se encuentre incluida la relación del personal técnico que tendrá a su cargo durante la realización de las obras y una lista detallada de la maquinaria o medios a utilizar, con sus rendimientos y capacidades, para cumplir los plazos establecidos. Del mismo modo, indicará las fechas límites en que se debe recibir de la Propiedad la información complementaria necesaria para poder desarrollar sus trabajos de acuerdo con el plan de obra previsto.

Se considerará como documento fundamental para la adjudicación del concurso el Cuadro de Precios presentado. Los errores que pudieran haberse cometido en los presupuestos

serán subsanados por la Propiedad o su representante legal, al estudiar las ofertas a partir de los datos del citado cuadro y de las mediciones del Anteproyecto.

Los precios unitarios se consideran actualizados hasta la fecha de presentación de la oferta que se indica en la carta de invitación. En los precios unitarios deberá incluirse la parte proporcional de los gastos generales, instalaciones, beneficios, etc. y todos los posibles gastos directos o indirectos relacionados con ellos.

No se considerará válida ninguna oferta que se presente fuera del plazo señalado en la carta de invitación o que no conste de todos los documentos.

La Propiedad pasará notificación del resultado del concurso a los diferentes concursantes. Si el Concurante no recibiese esta comunicación en el plazo también señalado en la carta de invitación, puede notificar a la Propiedad su renuncia al concurso.

La Propiedad comunicará al Adjudicatario la concesión de los trabajos objeto del concurso. La fecha de comienzo de los mismos será la que figure en el programa de trabajo.

Durante el periodo comprendido entre la adjudicación y la fecha de iniciación de los trabajos se formalizará entre la Propiedad y el Adjudicatario el Contrato correspondiente, que se trata en el siguiente punto.

1.3 Contrato

El Adjudicatario estará obligado al cumplimiento de la reglamentación del trabajo correspondiente, la contratación del seguro obligatorio, subsidio familiar o de vejez, seguro de enfermedad y todas aquellas reglamentaciones de carácter social vigentes en el momento de la ejecución de las obras. En particular, deberá cumplir, siempre que en el presente Pliego de Condiciones no se indique lo contrario, lo dispuesto en la norma *UNE 24042: Contratación de obras. Condiciones Generales*.

Serán de cuenta del Adjudicatario los gastos fiscales y todo tipo de gastos a que dé lugar la formalización del Contrato.

Cualquiera de las dos partes que intervienen en el contrato puede solicitar la elevación a escritura pública del convenio de adjudicación, corriendo en este caso los gastos que origine dicha elevación por cuenta de la parte peticionaria.

El Adjudicatario es el único responsable por la totalidad del suministro y servicios que se indican en el contrato, en estricto cumplimiento de las disposiciones contractuales y de las

buenas normas de la técnica. Esta responsabilidad implica que serán de su cuenta las modificaciones, reparaciones y sustituciones al exacto cumplimiento del contrato, así como las indemnizaciones justificadas por perjuicios causados por deficiencias, errores o atrasos laborales.

De ser necesario, la Propiedad podrá suspender los pagos al Adjudicatario y pedir indemnizaciones de acuerdo con lo establecido en el contrato sin perjuicio de la aplicación de penalidades o de rescisión.

Las relaciones con el Adjudicatario serán las establecidas a través de personas o entidades por la Propiedad.

La Propiedad podrá hacerse representar por consultores u otras entidades que pueda elegir para colaborar en los estudios, fabricación, montaje y ensayos.

El representante del Adjudicatario será designado por éste de acuerdo con la Propiedad. Durante el periodo de montaje esta persona estará presente y será responsable del equipo de montaje.

El Adjudicatario estará representado en todas las reuniones convocadas con un plazo no inferior a ocho días por la Propiedad, en la obra o en cualquier otro lugar que se le indique, mediante la presencia de técnicos especializados en las materias objetivo de dichas reuniones.

La lista de proveedores y principales empresas colaboradoras del Adjudicatario establecida en común acuerdo, entre éste y la Propiedad, no podrá ser modificada sin la aprobación escrita de la Propiedad. La aprobación por parte de la Propiedad de la lista de proveedores y empresas colaboradoras del Adjudicatario, no eximirá en ningún caso la responsabilidad de éste. El Adjudicatario no podrá ceder ni traspasar a terceros ninguna de sus obligaciones o derechos, ni utilizar en la ejecución de los trabajos otras empresas o sociedades que las que figuras en el contrato como aceptadas por la Propiedad. En todos los casos el Adjudicatario es plenamente responsable del contrato ante Propiedad, personal obrero y terceros. Si el Adjudicatario, sin previa autorización escrita por parte de la Propiedad, cediese o traspasase a terceros cualquiera de sus obligaciones o derechos derivados del contrato, o emplease en la ejecución de las obras otra empresa o sociedad que no estuviese previamente aceptada por la Propiedad, ésta aplicará las sanciones que crea oportunas, llegando incluso si fuese necesario a la rescisión del contrato, en cuyo supuesto sería de aplicación todo lo incluido bajo el epígrafe “Cese o aplazamiento de los trabajos, rescisión del contrato”, englobado dentro del apartado 9 del presente Pliego de Condiciones, concretamente en el punto 9.8.

La Propiedad puede indicar en la carta de invitación al concurso la fianza inicial y retenciones de garantía que se descontarán de las certificaciones. Estas cantidades serán retenidas por la Propiedad en caso de rescisión o abandono del trabajo por causas imputables al Adjudicatario. El Adjudicatario responde, además del cumplimiento de sus obligaciones, de todos los medios auxiliares, maquinaria y materiales que tenga depositados en la obra, los cuales no podrán ser retirados de la misma sin autorización escrita de la Propiedad.

El Adjudicatario es el único responsable de la correcta ejecución técnica de las obras, no teniendo derecho a indemnización alguna por el mayor precio a que pudiera resultar, ni por las falsas operaciones que cometa durante la construcción de las mismas, ni por las modificaciones que la Dirección Facultativa tenga a bien marcar, siendo dichas operaciones de su cuenta y riesgo, independientemente de las inspecciones ejercidas por la Dirección Técnica.

1.4 Programa

El programa general de los trabajadores (estudios, aprovisionamiento, fabricación, transporte, montaje y ensayos) a presentar con la propuesta deberá respetar los datos claves indicados en estas normas e información complementaria facilitadas. El programa deberá ser desarrollado, según las condiciones especificadas en estas normas, en otro de detalle, en el que se indicarán las fechas de conclusión de cada uno de los trabajos señalados en el trabajo inicial, así como la fecha intermedia cuyo cumplimiento dé lugar a la aplicación de penalidades. El plazo de presentación de este programa detallado será de treinta días a partir de la fecha de adjudicación.

El programa referido en el párrafo anterior deberá indicar la fecha límite en que se consideren indispensables los suministros para asegurar la continuidad de los trabajos, así como los datos referentes a la posibilidad del inicio de los trabajos de terceros.

La determinación del orden de los trabajos será facultad potestativa del Adjudicatario, salvo en aquellos casos en los que por cualquier circunstancia de orden técnico se estime conveniente su variación por el Ingeniero Director. Todos los trabajos se ejecutarán con estricta sujeción al proyecto que ha servido de base, a las modificaciones que sobre el mismo hayan sido aprobadas y las órdenes e instrucciones que entregue el Ingeniero Director al Adjudicatario, siempre que encaje dentro de la cifra a que ascienden los presupuestos aprobados.

El programa contractual de los trabajos no podrá ser alterado sin la conformidad expresa de la Propiedad. Además, siempre que la Propiedad proponga una alteración del programa, el

Adjudicatario se compromete a hacer todo lo posible para dar cumplimiento al deseo de la Propiedad, lo mismo se trate de adelantar como de atrasar un suministro.

El adjudicatario dará comienzo a las obras en el plazo marcado, desarrollándolas en la forma necesaria para que la ejecución total se lleve a efecto dentro del plazo exigido por el Contrato realizado con la Propiedad.

Obligatoriamente y por escrito, el Adjudicatario deberá dar cuenta al Ingeniero Director del comienzo de los trabajos antes de transcurrir veinticuatro horas desde su iniciación.

Si los trabajos se desarrollan con retraso en relación con el programa aprobado, serán aplicadas las penalidades correspondientes. Si el retraso fuera producido por motivos no imputables al Adjudicatario, éste puede solicitar de la Propiedad una prórroga del plazo de ejecución de sus trabajos. La Propiedad concederá una prórroga que será igual al tiempo perdido, a no ser que el Adjudicatario pidiera otra menor. La petición de prórroga por parte del Adjudicatario deberá tener lugar en el plazo máximo de un mes desde el día que se produzca la causa originaria del retraso, alegando las razones por las que se estime no serle imputables y señalando el tiempo probable de su duración. En caso de que el Adjudicatario no solicitase prórroga en el plazo anteriormente señalado, se entenderá que renuncia a su derecho y se considerará, a efectos de la aplicación del contrato, que los retrasos que se produzcan en relación con el programa de trabajos contractual con imputables al Adjudicatario.

El Adjudicatario se sujetará a las Leyes, Reglamentos y Ordenanzas vigentes, así como los que se dicten durante la ejecución de las obras. Queda obligado al cumplimiento de la Legislación vigente en lo relativo a los accidentes de trabajo por ser patrono, desde que toma a su cargo la organización de los trabajos contratados.

1.5 Estudios y documentación técnica

Por el hecho de acusar recibo de encargo, el Adjudicatario reconoce haber recibido de la Propiedad todos los datos y documentos de base necesarios para los estudios y proyectos. El Adjudicatario debe de pedir a la Propiedad, con la antelación suficiente, todas las informaciones complementarias y de detalle indispensables para la buena ejecución del suministro.

Los documentos contractuales y todos aquellos que la Propiedad entregue durante la ejecución del Contrato, deben de ser cuidadosamente revisados por el Adjudicatario. En caso de errores u omisiones, el Adjudicatario deberá proponer las modificaciones que estime convenientes para una buena ejecución del suministro.

El Adjudicatario proporcionará, en la fecha que se señale en el programa general de trabajo, los datos y condiciones indicados en estas normas y demás características de los materiales, especificaciones relativas a los mismos, planos y demás documentación técnica complementaria a la que figure en la oferta presentada, necesarios para una completa definición del equipo y servicios contratados, de manera que permitan a la Propiedad:

- Tener pleno conocimiento del estado tensional a que está cometido el equipo, en las distintas hipótesis del cálculo, garantías que ofrecen los materiales, las soldaduras y demás documentos incluidos en el suministro, así como se du funcionamiento, conservación y explotación.
- Efectuar la inspección de su fabricación y montaje.
- Estudiar y proyectar todos los trabajos afines que no incumben al Adjudicatario.

Todos los documentos facilitados por el Adjudicatario, así como leyendas y acotaciones, deberán estar escritos en español. La Propiedad podría aceptar documentos escritos en francés o inglés, reservándose el derecho a exigir traducciones al español, que serán considerados como los únicos documentos válidos.

La Propiedad comunicará al Adjudicatario, en el plazo que se señala en el programa general de trabajos, la aprobación o reparos a los documentos referidos en párrafos de anteriores documentos que conformas la total definición del equipo y servicios contratados, entendiéndose que estos están aprobados si en el referido pazo no hubiese hecho indicaciones al respecto. Los documentos sobre los que la Propiedad hubiese hecho observaciones antes de la fecha concertada, serán revisados por el Adjudicatario y nuevamente sometidos a la aprobación de la Propiedad dentro del plazo establecido en el programa general de trabajos. Si ésta no pudiese aprobarlos, convocaría una reunión para su discusión y resolución en el plazo de ocho días.

El Adjudicatario remitirá a la Propiedad, por quintuplicado, los ejemplares indicados en estas normas de cada uno de los documentos aprobados, en el plazo de quince días a partir de la fecha de aprobación. Los documentos aprobados no podrán ser modificados sin autorización escrita de la Propiedad. La aprobación de dibujos, notas de cálculo u otros documentos por parte de la Propiedad, no limita la responsabilidad del Adjudicatario, que se mantiene total. Todo documento o dibujo recibido por la Propiedad como parte del suministro, deberá ser tratado por ésta como de su propiedad a todos los efectos. De igual modo, también serán tratados como tal toda la documentación y dibujos enviados por la Propiedad al Adjudicatario para la ejecución del suministro, no pudiendo el Adjudicatario comunicar a terceros o publicar sus reproducciones sin autorización escrita de la Propiedad.

El Adjudicatario entregará un mínimo de tres copias de los Manuales de Instrucciones de los equipos suministrados.

El contenido del Manual de Instrucciones será como mínimo el que se describe a continuación:

- Descripción del equipo.
- Características nominales de diseño y de prueba.
- Composición y características de los materiales.
- Principios de operación.
- Instrucciones de la operación.
- Gradientes máximos, limitaciones y funcionamiento en condiciones distintas a las nominales.
- Lista de componentes o de despieces, con números de identificación, dibujos de referencia, nombre y características de la pieza (dimensiones, materiales, etc.).
- Instrucciones de montaje y desmontaje. Tolerancias.
- Instrucciones de mantenimiento.
- Pruebas y controles periódicos.
- Lista de repuestos.

1.6 Pliegos, instrucciones y normas aplicables

Las prescripciones de las instrucciones y normas que se recogen en la legislación vigente, serán de aplicación con carácter general, y en todo aquello que no reduzca el alcance de las instrucciones que se incluyen en el presente Pliego de Condiciones, para los materiales y la ejecución de las obras.

1.7 Seguridad y accidentes laborales

El Adjudicatario queda obligado al cumplimiento de la normativa referente al estudio de Seguridad e Higiene en el Trabajo y a la legislación vigente.

Todos cuantos aparatos, maquinaria, herramientas y medios auxiliares emplee el Adjudicatario en la ejecución de las obras deberán reunir las máximas condiciones de seguridad y resistencia, así como cumplir con todas las normas oficiales dictadas al efecto.

El personal del Adjudicatario está obligado a utilizar todos los dispositivos y medios de protección personales necesarios para eliminar o reducir los riesgos profesionales, pudiendo el Ingeniero Director suspender los trabajos si estima que el personal está expuesto a peligros no corregibles. Asimismo, el Ingeniero Director podrá exigir al Adjudicatario, ordenándolo por escrito, el cese de la obra de cualquier trabajador que, por imprudencia temeraria, pudiese provocar accidentes que hiciesen peligrar su propia integridad física o la de alguno de los demás empleados u obreros.

Toda la responsabilidad en los accidentes que pudieran ocurrir por el empleo de materiales defectuosos, por imprudencias o por el incumplimiento de lo anteriormente citado, recaerá exclusivamente en el Adjudicatario. Serán también de su exclusiva cuenta las multas en las que incurra por contravenir las disposiciones oficiales, así como los daños y desperfectos ocasionados a terceros en sus personas, bienes o haciendas.

El Adjudicatario queda en libertad de ejecutar los andamiajes que estime convenientes, siempre dentro de las normas de seguridad para el personal que señale en cada momento las Leyes o Reglamentos de Seguridad e Higiene o Accidentes de Trabajo.

El Ingeniero Director podrá exigir al Adjudicatario en cualquier momento, antes o después del comienzo de los trabajos, que presente los documentos que acrediten el haber formalizado los regímenes de la Seguridad Social en la forma legalmente establecida.

2. CALIDAD DE LOS MATERIALES

2.1 Consideraciones generales

Todas las materias primas suministradas por el Adjudicatario, estén o no recogidas en los documentos del presente Trabajo final de grado, deberán reunir las condiciones de calidad exigibles en la buena práctica de la construcción. La aceptación por la Propiedad de una marca, fábrica o lugares de extracción no exime al Adjudicatario del cumplimiento de estas prescripciones.

Deben presentarse previamente muestras para su aprobación y reconocimiento por el Ingeniero Director o en su defecto por el Subdirector de la Obra, sin cuya expresa aprobación no se podrá proceder a su colocación o empleo, pudiéndose obligar a la retirada del material no aprobado y colocado en la obra por parte del Adjudicatario, de no haberse procedido como se indica. Además, los materiales rechazados deberá ser inmediatamente retirados de la obra por

cuenta y riesgo del Adjudicatario, o depositados en los lugares indicados por la Dirección de Obra.

Cuando los materiales no fuesen de la calidad requerida en este Pliego de Condiciones o no tuviesen la preparación en éste exigida, o cuando a falta de prescripciones formales se reconociese o demostrase que no son adecuados para su función, la Propiedad dará orden al Adjudicatario para que a su costa los reemplace por otros que satisfagan o cumplan el objetivo al que se destinen.

El Adjudicatario, a su costo, transportará y colocará los materiales de utilizables, agrupándolos ordenadamente y en el sitio de la obra que, por no causar perjuicios a la marcha de los trabajos, se le designe. Los materiales procedentes de las excavaciones, derribos, etc., que no sean utilizables en la obra se retirarán de ésta o se llevarán al vertedero.

Si a pesar de todo fuesen advertidas faltas en un material aprobado y colocado, dicho material podría ser retirado a cuenta del Adjudicatario.

2.2 Aceros

El Adjudicatario indicará las características mecánicas de los aceros empleados, con arreglo a los siguientes elementos:

- Piezas de acero moldeado.
- Estructuras de acero laminado.

2.3 Resto de materiales

Para el resto de los materiales empleados en la fabricación del suministro, el Adjudicatario indicará sus características mecánicas, así como la composición química de los mismos.

3. NORMAS DE CÁLCULO

Serán de aplicación las normas DIN u otras de rango similar vigentes sobre bases de cálculo para construcciones hidráulicas de acero. El Adjudicatario indicará las tensiones de trabajo, simples y compuestas a que quedan sometidos los diferentes materiales que constituyen las estructuras. Asimismo, se indicarán las siguientes tensiones máximas de trabajo o tensiones base para el cálculo:

- Tensión admisible de tracción o compresión, previa comprobación del pandeo.
- Tensiones admisibles a esfuerzos cortantes.
- Tensión de comparación.

La tensión base o máxima de trabajo es un límite absoluto que no deberá ser sobrepasado ni siquiera en el caso de piezas sometidas a choques, esfuerzos dinámicos, fatigas locales o alternadas, vibraciones y oxidaciones. Se indicarán, asimismo, las cargas máximas transmitidas al hormigón por las fijas, así como las correspondientes a los órganos de maniobra. Los esfuerzos de compresión en el hormigón se atenderán a lo especificado en las normas DIN y no superarán, en cualquier caso, la carga de rotura según se define en la norma vigente.

Las conducciones blindadas y los revestimientos se dimensionarán para los estados de carga más desfavorables.

El Adjudicatario facilitará los cálculos completos de los elementos importantes del suministro e indicará los coeficientes de seguridad de elementos tales como cilindro y vástagos de servomotores, órganos mecánicos de cabestrantes, cadenas, cables, etc.

4. DISPOSICIONES GENERALES DE LAS OBRAS

4.1 Replanteo de la obra

El Ingeniero Director, una vez que el Adjudicatario esté en posesión del Proyecto y antes de comenzar las obras, deberá realizar el replanteo de la misma, con especial atención en los puntos singulares. Se levantará, por duplicado, un Acta de Replanteo firmada por el Ingeniero Director y el representante del Adjudicatario.

Todas las operaciones que se necesitan para el replanteo serán efectuadas por y a cuenta del Adjudicatario, no teniendo por ese concepto derecho a reclamación de ninguna clase.

Asimismo, está obligado a suministrar a su cargo a la Propiedad los medios y aparatos que la Dirección de Obra estime necesarios para llevar a cabo los replanteos de cualquier trabajo.

4.2 Plazo de ejecución

Los plazos de ejecución, tanto locales como parciales, señalados en el contrato, empezarán a contar a partir de la fecha de replanteo de las obras o desde la notificación por parte de la Propiedad de la autorización para el comienzo de éstas. El Adjudicatario estará obligado a cumplir dichos plazos, que serán improrrogables.

No obstante, los plazos podrán ser objeto de aplazamiento, cuando las modificaciones solicitadas por el Ingeniero Director y debidamente aprobadas por la Propiedad, influyan realmente en los plazos señalados en el contrato.

Si por causas ajenas por completo al Adjudicatario no fuese posible comenzar los trabajos en la fecha prevista o tuviesen que ser suspendidos una vez iniciados, el Ingeniero Director concederá una prórroga cuya duración será la estrictamente necesaria.

4.3 Mano de obra

El personal que tenga el Adjudicatario, como encargado, capataz, oficial, ayudante o peón, realizando unidades de obra, debe ser cualificado y responsable, al igual que todo el personal dependiente de los Subadjudicatarios, que en todo momento acatarán las órdenes dictadas por el Director de Obra.

El Adjudicatario deberá tener siempre en la obra el número de operarios proporcionado a la extensión y clase de trabajos que esté ejecutando. Éstos serán de aptitud reconocida y experimentados en sus respectivos oficios, y constantemente ha de haber en la obra una persona responsable y encargada del conjunto.

No se permitirá trabajar a ningún obrero que no se encuentre debidamente capacitado o en quien se note falta de costumbre de andar en los andamios, y si por omisión o inobservancia de las precauciones ocurriese una desgracia, serán de cuenta y riesgo del Adjudicatario las responsabilidades que tuvieran lugar.

La Dirección de la Obra podrá prohibir la permanencia en obra de determinado personal del Adjudicatario, por motivo de faltas de obediencia y respeto, o a causa de actos que

comprometan o perturben, a juicio de la misma, la marcha de los trabajos. El Adjudicatario podrá recurrir si entendiese que no hay motivo fundado para dicha prohibición.

La totalidad del personal empleado por el Adjudicatario y Subadjudicatario en la ejecución de las obras deberá estar debidamente afiliado al régimen general de la Seguridad Social, estando obligado a mantener en la oficina de obra los justificantes correspondientes. Además, el Adjudicatario está obligado a cumplir la legislación vigente en materia de contratos laborales y reglamentaciones de trabajo.

El Adjudicatario habilitará en la obra una oficina en la que tendrá siempre una copia de todos los documentos del proyecto que le hayan sido facilitados por el Ingeniero Director de Obra, así como los restantes documentos, equipos y materiales que estipulen. Asimismo, podrá sacar copias de los documentos del Proyecto de Contrata, cuyos originales les serán facilitados por el Ingeniero Director, el cual autorizará con su firma las copias si el Adjudicatario así lo desea.

El Adjudicatario, por sí mismo o por medio de sus facultativos, representantes o encargados, estará en la obra durante la jornada legal de trabajo y acompañará al Ingeniero Director o personas por él delegadas en las visitas que hagan a la obra, poniéndose a su disposición para la práctica de los reconocimientos que se consideren necesarios y suministrándole los datos y medios precisos para la ejecución y aprobación de mediciones, comprobaciones y liquidaciones. Asimismo, el Adjudicatario o su delegado vigilarán los trabajos de colocación de los andamios y cimbras y demás medios auxiliares. Comprobará que los materiales fabricados tales como viguetas, cargaderos, etc., del material que sea, llevan la garantía de fabricación, siendo el Adjudicatario el responsable de los accidentes que ocurran por incumplimiento de esta disposición o por no tomar las debidas precauciones.

Antes del inicio de las obras se procederá al replanteo general de las mismas, juntamente con el Director y Subdirector de Obra, realizándose la correspondiente Acta de Replanteo, que quedará plasmado en el Libro de Órdenes, considerándose dicha fecha como la del inicio de obra.

Todas las operaciones y los medios auxiliares necesarios para los replanteos serán de la exclusiva cuenta del Adjudicatario, pudiendo ser vigilados, comprobados y anulados por la Dirección Técnica.

El Adjudicatario no podrá reclamar ni percibir indemnización por sustracción, pérdidas o averías u otros perjuicios acaecidos durante la obra. Sin embargo, será responsable de las pérdidas de material que se le entregase a su custodia, descontándosele un importe de las

cantidades a percibir. Sería igualmente responsable de cualquier daño en las propiedades colindantes, estando obligado a repararlas y dejarlas en su estado primitivo.

4.4 Reforma del proyecto

Si durante el transcurso de las obras el Ingeniero Director estimase conveniente introducir modificaciones en el Proyecto, el Adjudicatario estará obligado a realizarlas, siempre y cuando la cantidad de las obras nuevamente proyectadas no aumentase ni disminuyese en proporción el Pliego de Condiciones.

No se considerarán mejoras y variaciones del Proyecto más que aquéllas que hayan sido ordenadas expresamente por escrito por el Ingeniero Director.

Si antes de comenzar las obras o durante su construcción la Propiedad, de acuerdo con el Ingeniero Director, resolviese ejecutar por sí misma parte de las obras que comprende la contrata o acordase introducir en el proyecto modificaciones que impongan aumento o reducción, y aún supresión de las cantidades marcadas en el presupuesto, serán obligatorias para el Adjudicatario estas disposiciones, sin que tenga derecho en caso de supresión de obra a reclamar ninguna indemnización con el pretexto de pretendidos beneficios que hubiera podido obtener en la parte reducida o suprimida. Aun cuando las reformas que hicieran variar los trazados, si se le participan al Adjudicatario con la debida anticipación, no podrá exigir indemnización alguna bajo ningún concepto.

Tendrá derecho, en caso de modificación, a que se le prorrogue prudencialmente, y a juicio del Ingeniero Director de la Obra, el plazo para la terminación de las obras.

4.5 Contrataciones, omisiones o errores en los documentos

En el caso de contradicción entre los Planos y el Pliego de Condiciones, prevalecerá lo prescrito en éste último. Lo mencionado en el Pliego de Condiciones y omitido en los Planos, o viceversa, habrá de ser aceptado como si se incluyese en ambos documentos, siempre que, a juicio del Ingeniero Directos, quede suficientemente definida la unidad de obra correspondiente y ésta tenga precio en el contrato.

Los diversos capítulos del presente Pliego de Condiciones son complementarios entre sí, entendiéndose que las prescripciones que contenga uno de ellos y afecte a otros obligan como

si apareciesen en todos. Las contradicciones o dudas entre sus especificaciones se resolverán por la interpretación que razonadamente haga el Ingeniero Director.

En todo caso, las contradicciones, omisiones o errores que se adviertan en estos documentos, tanto por el Ingeniero Director como por el Adjudicatario, deberán reflejarse preceptivamente en el Acta de Replanteo.

4.6 Trabajos defectuosos o no autorizados

Cuando el Ingeniero Director o su representante en la obra advierta vicios o defectos en los trabajos efectuados, los materiales empleados o los aparatos colocados no reúnan las condiciones preceptuadas, ya sea en el curso de la ejecución de los trabajos o finalización de éstos y antes de verificarse la recepción definitiva de la obra, podrá disponer que las partes defectuosas sean demolidas y reconstruidas según el contrato, y todo ello a expensas del Adjudicatario. Si éste no estimase justa la reclusión y se negase a la demolición y reconstrucción ordenada, se procederá según los siguientes pasos:

- Cuando los materiales o aparatos no fuesen de la calidad requerida o no estuviesen perfectamente preparados, el Ingeniero Director dará orden al Adjudicatario para que los reemplace por otros que se ajusten a las condiciones requeridas por los Pliegos o a falta de éstos, a las órdenes del Ingeniero Director.
- El Ingeniero Director podrá, si las circunstancias o el estado de la obra lo aconsejan, permitir el empleo de aquellos materiales defectuosos que le parezcan, o aceptar o imponer materiales de calidad superior a la indicada si no le fuese posible al Adjudicatario suministrar los de la calidad deseada, descontándose en el primer caso la diferencia de precio del material requerido al defectuoso empleado, y no teniendo derecho el Adjudicatario a indemnización alguna en el segundo.

El Adjudicatario es el único responsable de la ejecución de los trabajos que ha contratado y de las faltas y defectos que éstos pudieran tener por su mala ejecución y por la diferencia de la calidad de los materiales empleados o aparatos colocados, sin que pueda servir de excusa ni le otorgue derecho alguno la circunstancia de que el Ingeniero Director o sus subalternos no le hayan llamado la atención sobre el particular, ni tampoco el hecho de que hayan sido valoradas en las certificaciones y participaciones de obra.

4.7 Suspensión de las obras

Cuando la Propiedad desee suspender la ejecución de las obras, tendrá que avisar al Adjudicatario con un mes de antelación, y el Adjudicatario tendrá que suspender los trabajos sin derecho a indemnización, siempre que se le abone el importe de la obra ejecutada y el valor de los materiales acumulados a pie de obra al precio corriente en la localidad. Se hará lo mismo en caso de rescisión justificada.

Si la suspensión de las obras fuese motivada por el Adjudicatario, el Propietario se reserva el derecho a la rescisión del contrato, abonando al Adjudicatario sólo la obra ejecutada, con pérdida de la garantía como indemnización de perjuicios generados en la entidad propietaria, quedando siempre el Adjudicatario obligado a responder de los perjuicios superiores a esta entidad.

En caso de muerte o de quiebra del Adjudicatario, quedará rescindida la Contrata a no ser que los herederos o los síndicos de la quiebra ofrezcan llevarla a cabo bajos las condiciones estipuladas en la misma. La Propiedad puede admitir o desechar el ofrecimiento, sin que en este último caso tengan aquéllos derecho a indemnización alguna.

Tanto en los caso de rescisión como en los que legalmente se pudiesen presentar, las herramientas y demás elementos de trabajo que sean de pertenencia del Adjudicatario, tendrá éste obligación de recogerlos en un plazo de ocho días; de no ser así, se entiende que los abandona a favor de la obra. Son casos de rescisión de obras las siguientes:

- El no ejecutar las obras con arreglo al proyecto o modificaciones indicadas.
- El empleo deficiente de los materiales o su mala colocación en obra, que obligue insistentemente a demoler la misma, o a valorar obra defectuosa.
- El que las obras no se ejecuten al ritmo previsto.
- Incapacidad del personal empleado, tanto técnico como de obra.
- Quiebra o suspensión de pagos por el Adjudicatario.
- La suspensión de la obra comenzada, siempre que el pago exceda a seis meses.
- El no dar comienzo la Contrata a los trabajos dentro del plazo señalado en las condiciones del proyecto o contrato.
- El incumplimiento de las condiciones del contrato, cuando indique descuido o mala fe, con perjuicios de los intereses de las obras.
- La terminación del plazo de ejecución de las obras sin haberse llegado a ellas.
- El abandono de la obra sin causa justificada.
- Muerte o incapacidad del Adjudicatario.

- Alteraciones del contrato, de forma que supongan modificaciones del proyecto o de las unidades de obra en un 25%, como mínimo, del importe de aquél y en un 50% de las unidades modificadas.
- La suspensión de la obra comenzada y en todo caso siempre que por causas ajenas a la contrata no se dé comienzo a la obra adjudicada dentro del plazo de tres meses a partir de la adjudicación.
- Por toda causa de fuerza mayor que obligue a suspender las obras indefinidamente.

En los diez primeros casos, la fianza quedará a beneficio de la Propiedad. En todos los otros casos, la Propiedad se reservará el derecho de continuar las obras, bien por si misma, bien por las personas o entidad que estime conveniente.

4.8 Seguros

El adjudicatario está obligado, después de la comprobación del replanteo y antes del comienzo de la obra, a facilitar a la Dirección la documentación que acredite haber suscrito, además de las correspondientes afiliaciones a la Seguridad Social, las siguientes pólizas de seguro:

- Seguro contra daños a terceros que se deriven de la ejecución del proyecto.
- Seguro de Accidentes de Trabajo en la Mutualidad Laboral correspondiente.
- Seguro de Automóviles para todos aquellos vehículos del Adjudicatario que tengan acceso a la obra.
- Seguro para toda la maquinaria y equipo que el Adjudicatario utilice en el trabajo.
- Seguro de incendios para las obras, en Compañías de reconocida solvencia, inscrita en el Ministerio de Hacienda en virtud de la vigente ley de seguros.

5. ENSAYOS, PRUEBAS Y PROTECCIONES

5.1 Ensayos en taller

Todas las uniones soldadas serán inspeccionadas mediante control radioscópico de las soldaduras, que se harán en presencia de representantes de la Propiedad y del Adjudicatario, teniendo en cuenta los plazos fijados.

Se ensayarán mecánicamente varias probetas de soldadura realizadas con materiales y operarios que hayan de intervenir en la obra.

Para el caso de los tanques de almacenamiento se inspeccionarán el 10% de los cordones de soldadura según la norma ASME sección VIII.

Los cilindros de los servomotores y demás órganos que contengan aceite a presión, como son los cuerpos de las bombas de aceite, y sus correspondientes válvulas, serán sometidas en taller a una presión de ensayo igual a la de servicio aumentada en un 50%. Los esfuerzos durante el ensayo no deberán, en ningún caso, sobrepasar el 40% de la carga de rotura, ni el 80% del límite elástico. Durante dicho ensayo no deberán de producirse deformaciones apreciables, ni fugas, ni filtración alguna.

Para el trazado de curvas de altura manométrica, potencia y rendimiento, se considerarán al menos cinco puntos, desde el caudal cero al caudal máximo nominal.

5.2 Presentación en taller

Con el fin de prever posibles dificultades que pudieran presentarse en la obra en el montaje definitivo de los elementos objeto de suministro, la Propiedad puede exigir que se realice en taller una presentación completa de los distintos elementos comprobándose cotas, que las superficies sean planas, etc.

5.3 Protección contra la corrosión

El sistema de protección con pinturas de las diferentes superficies metálicas tendrá que responder a las condiciones ambientales de la zona geográfica del almacenamiento y a la naturaleza de los productos manejados y condiciones de funcionamiento.

El Adjudicatario deberá proponer la protección más aconsejable, de acuerdo con su experiencia para su aprobación por la Propiedad. Esta protección deberá, de una manera general, aplicarse a todas las superficies en contacto con el agua y la intemperie, de todos los elementos fabricados con metales oxidables y comprenderá: limpieza de chorro de arena, metalización de zinc, según normas AENOR A 91-201, con una capa de zinc de 0,12 mm de espesor, seguida de pintura, con 3 manos como mínimo, de características convenientemente justificadas. No obstante, la Propiedad se reserva el derecho a ejecutar total o parcialmente la protección contra la corrosión, en todo o en parte del suministro, por cuyo motivo el Adjudicatario detallará en el

presupuesto el importe de operaciones que podrán ser deducidas del costo total en el caso de que la Propiedad los ejecutara directamente.

Se procederá al desengrasado de las partes del suministro que estén mecanizadas y se protegerán con una pintura vinílica incolora del tipo arrancable.

El tiempo transcurrido desde el tratamiento de una superficie metálica y la aplicación de la pintura no puede ser superior a 24 horas.

6. FABRICACIÓN, MONTAJE, RECEPCIÓN Y GARANTÍAS

6.1 Inspección fabril

La Propiedad se reserva el derecho a efectuar directamente o por medio de una entidad de su elección, la inspección de la fabricación de los equipos con vistas al cumplimiento de los plazos, a la calidad de los materiales y a las técnicas empleadas, tanto en las fábricas o instalaciones del Adjudicatario, como en la de sus suministradores.

A efectos de la cláusula anterior, el Adjudicatario se ve obligado a asegurar en cualquier momento a los representantes de la Propiedad, debidamente acreditados, el libre acceso a las fábricas o instalaciones, así como proporcionar todas las facilidades para que estos puedan cumplir su misión.

El Adjudicatario deberá informar a la Propiedad, en tiempo útil, de la fecha fijada para la realización de los ensayos previstos y de recepción de materias primas, así como de la realización de las operaciones más importantes de fabricación o de montaje en banco, de manera que la Propiedad pueda enviar a sus representantes a presenciar dichos ensayos u operaciones, si lo estimase necesario.

Independientemente de la presencia o no de los representantes de la Propiedad, el Adjudicatario deberá repartir a ésta, por triplicado, memorias de todos los ensayos realizados.

6.2 Montaje e inspección

Se deberá presentar para su aprobación una relación nominal del personal técnico que se ocupará de la ejecución de los montajes, indicando las funciones a realizar por cada uno de ellos y acreditando su capacidad técnica para el desarrollo de los mismos.

En caso de que a juicio de la Propiedad, el personal técnico designado por el Adjudicatario sea insuficiente, éste se obliga a completar su organización con el número de técnicos necesarios, según el criterio de la Propiedad.

La Propiedad se reserva el derecho de recusar, en caso de no satisfacerle el desarrollo de las operaciones de montaje, tanto al representante del Adjudicatario como a cualquier otro miembro de su organización en la obra y éste se obliga a sustituirlo en un plazo de treinta días por otro de igual categoría.

El Adjudicatario podrá cubrir con Compañías de Seguros los riesgos relativos a los materiales y equipos en curso de montaje. Además, este seguro será ampliado para cubrir los daños que cause a la Propiedad o a terceros, durante y por causa de las operaciones de montaje. La Propiedad podrá señalar la obligatoriedad del seguro de materiales y equipos en curso de montaje. En este caso, el seguro será complementario del establecido para el transporte y deberá ser válido hasta el inicio del servicio industrial.

El personal de la inspección de la Propiedad podrá ordenar la suspensión de los trabajos que no estuviesen ejecutados de acuerdo con las condiciones y especificaciones contractuales. La orden de suspensión será confirmada por escrito.

Siempre que fuese necesario enviar una pieza o equipo a fábrica como consecuencia de un error o avería, los gastos de transporte, seguros y otros, correrán por cuenta del Adjudicatario.

Los gastos, encargos y cualquier formalidad necesaria para la importación temporal o reexplotación de herramientas, instrumentos o material a utilizar en la ejecución del suministro, serán a cargo del Adjudicatario.

La Propiedad fiscalizará directamente a través de sus representantes los trabajos de montaje. A este efecto, se le asegurará al personal de inspección de la Propiedad, el libre acceso a cualquier hora a las oficinas de obra, almacenes u otros locales de trabajo del Adjudicatario, que está obligado a facilitarle cuantos datos y aclaraciones sean precisas.

6.3 Controles

El Adjudicatario se asegurará, por unos controles apropiados, de la buena calidad del material, entregado. Los resultados de estos controles serán sometidos a la aprobación de la Propiedad quien podrá exigir, si lo cree necesario, la realización de controles suplementarios.

6.3.1 Cambiadores de calor

Antes de iniciar la fabricación de los cambiadores de calor, el Proveedor someterá a la aprobación de la Propiedad los procedimientos de soldadura (WPS) que ha de utilizar, debidamente respaldados por sus certificados correspondientes de calificación (PQR), emitidos por una Entidad Colaboradora de la Administración (ENICRE), así como los certificados de homologación de los soldadores que han de participar en la fabricación.

Examen visual del aspecto general, sin que se aprecien defectos de fabricación o de transporte.

Ensayos de pruebas o presentación de documentos acreditativos, según las normas correspondientes.

6.3.2 Tuberías

Las tuberías se deberán manipular sin movimientos bruscos y sin arrastre de material por el terreno. Asimismo, se deberá realizar la inspección visual del aspecto general, sin que se aprecien defectos de fabricación o de transporte.

Se deberá recopilar la copia de solicitud y aceptación del suministro del material por el Adjudicatario y el Proveedor, respectivamente, con el albarán de recepción. Se incluirá, además, el Certificado de Fabricación y Pruebas de los lotes suministrados.

Se realizará la identificación de las tuberías con grabado longitudinal de la designación comercial, material, diámetro, espesor, presión de trabajo, normas y año de fabricación.

6.3.3 Columnas y depósitos a presión

Se realizará el suministro en unidades, según capacidad, con los equipos perfectamente terminados, sin defectos superficiales de fabricación o transporte.

Se deberán recopilar la copia de solicitud y aceptación del suministro del material por el Adjudicatario y el Proveedor, respectivamente, con albarán de recepción. Se incluirá Certificado de Fabricación y Pruebas de los lotes suministrados.

Se identificará los depósitos mediante una placa situada al lado de la boca en la que figure la designación comercial, número de registro y fabricación, presión de prueba, superficie exterior, capacidad y fechas de pruebas.

Asimismo, se realizará un examen visual del aspecto general, sin que se aprecien defectos de fabricación o de transporte.

6.3.4 Bombas

Comprobar que la instalación está completa y que el sistema de lubricación ha sido llenado de aceite.

Verificar que el motor y las bombas están adecuadamente ordenados. Se debe comprobar que todos los componentes del sistema de limpieza: filtros, orificios de restricción, presostatos, alarmas de nivel, enfriadores, están correctamente instalados y limpios.

6.3.5 Prueba hidráulica en taller

La Propiedad podrá exigir la realización de una prueba hidráulica en taller. El Adjudicatario deberá proveerse de los fondos de cierre para poder realizarlos. La presión de prueba que se determinará en cada caso no será inferior a 1,5 veces la presión máxima de diseño.

Si las pruebas revelasen defectos inadmisibles, tales como fugas y deformaciones locales, el Adjudicatario someterá a la aprobación de la Propiedad el procedimiento de reparación y una vez reparada la pieza se repetirá la prueba hidráulica.

6.4 Acta de fin de montaje

Cuando el Adjudicatario considere que los equipos están aptos para entrar en servicio, lo comunicará por escrito a la Propiedad y se procederá en conjunto a una revisión general del montaje, levantándose, si procede, un acta de montaje, firmada por representantes cualificados de ambas partes.

6.5 Ajustes, ensayos y servicio experimental

Finalizado el montaje, serán efectuados ajustes, ensayos y puestas en servicio experimentales de acuerdo con las condiciones establecidas.

La instrucción de adiestramiento del personal de la Propiedad por parte del Adjudicatario será efectuada en este periodo.

Salvo que se establezca otro acuerdo, la transferencia del equipo y materiales objeto de suministro, tendrá lugar en la fecha de su entrada en servicio industrial; sin embargo, la transferencia de posibles equipos importados por la Propiedad se hará con la entrega del conocimiento de embarque, carta de porte o documento similar, si bien el riesgo y la garantía serán por cuenta del Adjudicatario hasta la entrada de los equipos en servicio industrial.

6.6 Recepción provisional

Finalizado el servicio experimental y simultáneamente al comienzo del servicio industrial, será levantada un Acta de Recepción Provisional signada por representantes cualificados de ambas partes, previos los ensayos de recepción correspondientes. Si por motivos no imputables al Adjudicatario los ensayos de recepción no pudiesen ser efectuados, la recepción provisional será considerada como realizada 120 días después de la fecha en que las pruebas debieron haber comenzado. Sin embargo, el Adjudicatario está obligado a realizar dichos ensayos antes de la fecha de recepción definitiva.

Se levantará un Acta de Recepción de Obras por triplicado, por parte de la Dirección Técnica, en la que se hará constar las deficiencias que en su caso existiesen en aquéllas y el plazo para su subsanación.

Si las obras se encuentran en buen estado y han sido ejecutadas con arreglo a las condiciones establecidas, se darán por recibidas, comenzando a correr en dicha fecha el plazo de garantía establecido en el Contrato que, como mínimo, será de 3 meses.

Si las obras no se hallasen en estado de ser recibidas, se hará constar en el Acta y se especificarán en la misma las instrucciones precisas y detalladas que se deben señalar al Adjudicatario y/o Proveedor para remediar los defectos observados, fijando un plazo para subsanarlos, después del cual se realizará un nuevo reconocimiento en idénticas condiciones a fin de proceder de nuevo a la recepción provisional de la obra. Los trabajos de recepción corren de cuenta del Adjudicatario de forma que, de no cumplirse las prescripciones, el contrato podrá considerarse como rescindido, con la pérdida de la fianza.

6.7 Periodo de garantía

La fecha del Acta de Recepción Provisional será el comienzo del periodo de garantía. El Adjudicatario podrá mantener todo o parte de su personal especializado en la obra, si bien tomará las medidas necesarias para su presencia, siempre que la Propiedad lo exija, o bien como consecuencia de anomalías de funcionamiento o averías.

Durante el periodo de garantía, el Adjudicatario sustituirá toda o cualquier pieza o equipo defectuoso, debido a la mala concepción, defecto o calidad inadecuada de las materias primas utilizadas, defecto de fabricación o error de montaje. Todas estas sustituciones y posibles trabajos de construcción civil deberán ser hechas lo más rápidamente posible, sin gasto alguno por parte de la Propiedad.

No eximirá al Adjudicatario de responsabilidad alguna el hecho de que el Ingeniero Director o sus subalternos hayan examinado las obras durante su construcción, reconocido sus materiales o hecha la valoración en las relaciones parciales. En consecuencia, de observarse vicios o defectos antes de la recepción definitiva se podrá disponer la demolición o reconstrucción de las partes defectuosas.

Durante el periodo de garantía, todo o cualquier equipo, componente o pieza a sustituir por otro u otros en razón de esa misma garantía, tendrá a partir de la fecha de entrada en servicio un periodo de garantía igual a la del equipo o a la de la pieza que sustituya.

Si, como consecuencia de defectos o accidentes imputables al Adjudicatario, el equipo pudiese funcionar en parte o en todo el periodo de garantía, la duración del periodo de paro será añadida al plazo de garantía.

6.8 Recepción definitiva

Finalizado el periodo de garantía, se efectuará un examen general del equipo y, en caso de resultar éste de conformidad, se procederá a la recepción definitiva, levantándose acta que será firmada por representantes cualificados de la Propiedad y del Adjudicatario.

Hasta que el representante de la Propiedad no haya aprobado la recepción definitiva de los trabajos, el Adjudicatario se hará cargo de roturas, robos de material, averías, etc., cualquiera que fuese el motivo, aun cuando el desperfecto se haya producido en una operación ordenada por la Propiedad con el conocimiento del Adjudicatario.

Si son necesarias pruebas de funcionamiento, capacidad de producción, etc., para la recepción definitiva del algún elemento o del conjunto, el Adjudicatario dirigirá dichas pruebas y cargará con los gastos de todos los medios y creación de condiciones, salvo si todos o parte de tales gastos fueron incluidos en la adjudicación como obligaciones de la Propiedad.

Previamente a la recepción definitiva, serán resultas todas las reclamaciones formuladas y habrán transcurrido todos los plazos de garantía de los equipos, componentes o piezas que hayan sido sustituidas.

Podrán hacerse recepciones definitivas parciales en los casos en los que se considere oportuna esta decisión

Efectuada la recepción definitiva de todo el suministro, cesa la garantía establecida.⁷

7. ALMACENAMIENTO, SEGUROS Y TRANSPORTE

7.1 Almacenamiento

La Propiedad indicará la capacidad de los almacenes o explanadas de acopio de los que dispondrá el Adjudicatario en Obra, así como la fecha en que podrá disponer de ellas.

Queda terminantemente prohibido, salvo autorización escrita del Ingeniero Director, efectuar acopios de materiales, cualquiera que sea su naturaleza, en zonas que dificulten el adecuado transcurso de los trabajos.

Los materiales se almacenarán de forma tal que se asegure la preservación de su calidad para su utilización en obra, requisito que deberá ser comprobado en el momento de dicha utilización.

Las superficies empleadas como zonas de acopio deberán acondicionarse una vez finalizado el uso de los materiales en ellas acumulados, de forma que puedan recuperar su aspecto original.

Todos los gastos de almacenamiento, manutención y guarda, serán a cargo del Adjudicatario.

7.2 Transporte

Salvo indicación en contra por parte de la Propiedad, compete al Adjudicatario transportar todos los materiales y equipos objeto del suministro desde sus fábricas a las instalaciones de la obra, colocándolos en buenas condiciones de manejabilidad, conservación y seguridad en los lugares destinados a ese fin por la Propiedad.

El Adjudicatario deberá prever que ninguna expedición sea hecha desde sus fábricas o desde las de sus suministradores sin aprobación previa de la Propiedad, teniendo en cuenta que:

- Se respetarán las fechas previstas en el programa general de trabajos.
- El escalonamiento de envíos en las fechas más favorables a la buena marcha de los trabajos.
- La eventual inspección de los embalajes y otras condiciones de transporte.
- La eventual colaboración de la Propiedad en la resolución de los problemas de transporte que puedan resultar de volúmenes o pesos excesivos, en especial cuando su resolución dependa de Organismo Oficiales del Estado.

La aceptación por parte de la Propiedad de los embalajes, acondicionamiento y medio de transporte no liberan la responsabilidad del Adjudicatario en lo que respecta al transporte, así como al funcionamiento y duración de los materiales y equipos expedidos.

Los embalajes de los materiales y equipos entregados en las instalaciones de la obra pasarán a ser dominio de la Propiedad después de su utilización

El Adjudicatario deberá prever que la Propiedad reciba para cada expedición, con antelación suficiente, una lista de embalajes con indicación de los respectivos contenidos, pesos, dimensiones y marcas, permitiendo una identificación fácil y correcta.

7.3 Seguros

El seguro de materiales y equipos en tránsito será efectuado por el Adjudicatario, a no ser que la Propiedad haga constar expresamente que hará el seguro por su cuenta.

7.4 Importación de materiales y equipos

Los trámites aduaneros de los equipos fabricados en el extranjero y de los materiales (partes, piezas o accesorios) destinados a ser incorporados a los equipos fabricados en España, serán hechos por el Adjudicatario en nombre de la Propiedad.

En el caso de que el Adjudicatario no pudiese llevar a cabo los trámites citados en la anterior cláusula, la Propiedad llevará a cabo la tramitación y despacho en aduanas de los materiales importados, por cuenta del Adjudicatario. Obtendrá a su debido tiempo la documentación necesaria para la importación y para el paso en tránsito por un tercer país, en caso de que fuese necesario.

El Adjudicatario deberá comunicar por escrito a la Propiedad, por cada fabricante extranjero y en relación con el equipo a importar, los siguientes elementos: designación, peso líquido, valor, procedencia y moneda de pago. Asimismo, deberá obtener, a su debido tiempo, la documentación necesaria para que los trámites aduaneros se efectúen en las mejores condiciones, independientemente de que la Propiedad gestione, si procede, la exención de derechos de importación.

8. ORGANIZACIÓN DE LAS OBRAS

8.1 Dirección de las obras y representación del Adjudicatario

La dirección del conjunto de las obras estará a cargo del personal técnico de la Propiedad. Se indicará en cada caso al Adjudicatario quién es el Ingeniero Encargado o Director Técnico de la Obra, cuyas principales funciones, que afectan fundamentalmente a las relaciones con el Adjudicatario, son:

- Exigir al Adjudicatario, directamente o a través del personal a sus órdenes, el cumplimiento de las condiciones contractuales.
- Garantizar la ejecución de las obras con estricta sujeción al proyecto aprobado, o modificaciones debidamente autorizadas, y el cumplimiento del programa de los trabajos.
- Definir aquellas condiciones técnicas que el presente Pliego de Condiciones deje a su decisión.

- Resolver todas las ecuaciones técnicas que surjan en cuanto a interpretación de planos, condiciones de materiales y de ejecución de unidades de obra, siempre que no se modifiquen las condiciones del contrato.
- Estudiar las incidencias o problemas planteados en los trabajos que impidan el normal cumplimiento del contrato o aconsejen su modificación, transmitiendo en su caso las propuestas correspondientes.
- Proponer las actuaciones pertinentes para obtener, de los organismos oficiales y de los particulares, los permisos y autorizaciones necesarios para la ejecución de las obras y ocupación de los bienes afectados por ellas, y resolver los problemas planteados por los servicios y servidumbres relacionados con las mismas.
- Asumir personalmente y bajo su responsabilidad, en casos de urgencia o gravedad, la dirección inmediata de determinadas operaciones o trabajos en curso, para lo cual el Adjudicatario deberá poner a su disposición el personal y material de la obra.
- Participar en las recepciones provisional y definitiva y redactar la liquidación de las obras, conforme a las normas legales establecidas.

El Adjudicatario estará obligado a prestar su colaboración al Ingeniero Director para el normal cumplimiento de las funciones a éste encomendadas.

Antes de iniciarse los trabajos, el Adjudicatario deberá indicar a la Propiedad el nombre de su representante al frente de los mismos, que actuará como Jefe de Montaje, tanto en los aspectos técnicos como económicos. Los poderes del Jefe de Montaje deben ser los suficientemente amplios para recibir y resolver en consecuencia las comunicaciones y órdenes de la Propiedad. En ningún caso constituirá motivo de excusa para el Adjudicatario la ausencia de su representante a pie de obra.

Al mismo tiempo, deberá presentar para su aprobación, la relación nominal de personal técnico que se ocupará de la ejecución de los montajes, indicando las funciones a desarrollar por cada uno de ellos.

La Propiedad se reserva el derecho de recusa al Jefe de Montaje o a cualquier otro técnico destinado por el Adjudicatario en la obra durante el desarrollo de los trabajos, obligándose éste a sustituirlo en un plazo de 30 días por otro de igual categoría, como se ha mencionado anteriormente en el presente Pliego de Condiciones.

En caso de que, a juicio de la Propiedad, el personal técnico designado por el Adjudicatario sea insuficiente para la buena marcha de los trabajos, éste se obliga a completar

su organización con el número de técnicos que fuera necesario según el criterio de la Dirección de Obra.

8.2 Terrenos necesarios para la ejecución de las obras

La Propiedad indicará al Adjudicatario los límites de los terrenos de su propiedad dentro de los cuales puede montar sus instalaciones y dará acceso a los mismos. Todo esto estará indicado en los planos que se entreguen a los concursantes para el estudio de las ofertas.

Se supone en el Adjudicatario un conocimiento perfecto de la disposición del conjunto de los terrenos, de la importancia y situación de los trabajos objeto del contrato, de la naturaleza y estado de los terrenos, de los emplazamientos reservados para las obras, de los medios de acceso, así como de las condiciones climáticas de la región, especialmente aquéllas que puedan afectar a los trabajos.

La obligación de la Propiedad en cuanto a entrega de los terrenos necesarios queda limitada a los que figuran y se reseñan en los planos que se entreguen a los concursantes con la petición de oferta que, al mismo tiempo, definirán lo que se entiende por zona de montaje.

Si por conveniencia del Adjudicatario éste deseara disponer de otros terrenos distintos de los figurados y reseñados en los planos antes citados, será de su cargo la adquisición o la obtención de las autorizaciones pertinentes, debiendo el Adjudicatario someter previamente a la conformidad de la Propiedad las modalidades de adquisición o de obtención de la autorización respectiva.

El Adjudicatario será responsable de los daños que puede causar en las vías públicas y en los caminos de acceso si éstos son de particulares o de la Propiedad. Se obliga también a cumplir todas las limitaciones y solicitar los permisos de transportes especiales, etc. En cualquier caso, el Adjudicatario responde de todos los perjuicios que, como consecuencia del contrato, se puedan causar a terceras personas, inmuebles, cosechas, etc., y son de su competencia las reclamaciones que puedan formularse con ocasión de dichos perjuicios.

8.3 Instalaciones auxiliares

En el caso de que la obra se construya en una zona en la que la Propiedad distribuya energía eléctrica, ésta facilitará al Adjudicatario la potencia necesaria para sus instalaciones y le indicará el precio que le cobrará por la energía consumida.

El abastecimiento de agua y de aire comprimido necesario para la obra será de cuenta del Adjudicatario y su instalación deberá cumplir las normas y reglamentos oficiales en vigor.

La Propiedad podrá facilitar, caso de disponer de los mismos, materiales y medios auxiliares en las condiciones que se establezcan.

Serán cuenta y responsabilidad del Adjudicatario:

- Los medios para asegurar la vigilancia y conservación del material almacenado en obra o curso de montaje.
- Los medios y los materiales necesarios para construcción, conservación, desmontaje, demolición o retirada en el plazo que se le señale, de sus instalaciones en obra, tales como oficinas, almacenes, comedores, etc.
- Todas las herramientas o medios necesarios para la ejecución del montaje, tales como andamios, escaleras, diferenciales, etc., y materiales de consumo de corriente como electrodos, lubricantes, etc.
- Todos los ensayos de materias primas o componentes que se estimen necesarios en curso de montaje, sean efectuados en laboratorio de obra o foráneos.
- Las diligencias o gastos necesarios para la realización de las operaciones normales de inspección por parte de los organismos oficiales.

El Adjudicatario no podrá ampararse, con el fin de eludir las obligaciones del contrato, en las dificultades que puedan ser ocasionadas por la ejecución simultánea de otros trabajos o instalaciones confiadas por la Propiedad a otros contratistas o suministradores que intervengan en la realización del mismo proyecto.

El Adjudicatario no podrá reclamar si en el curso de los trabajos y para cumplimiento normal del contrato se viese obligado a aumentar la importancia de su material, en calidad o en cantidad, en relación con sus previsiones iniciales. De cada nueva aportación de maquinaria se formalizará una nota a la que forma parte del contrato para la maquinaria y útiles aportados inicialmente, que se unirá como anexo al contrato.

Sin embargo, cuando el Adjudicatario se vea obligado a poner en servicio material suplementario para responder, bien a circunstancias imprevistas en el contrato o bien a causas de fuerza mayor debidamente comprobadas y, en cualquiera de ambos casos, reconocidas previamente por la Propiedad, la utilización de ese material será de abono por aplicación de precios complementarios establecidos de común acuerdo, conforme a las disposiciones que se fijan en este Pliego.

8.4 Relaciones entre la Propiedad y los diversos contratistas

El Adjudicatario está obligado a suministrar, en cualquier momento, toda la información relativa a la ejecución del contrato que la Propiedad juzgue necesaria tener conocimiento por razón de las posibles incidencias de los trabajos confiados al Adjudicatario, sobre los de otros contratistas o suministradores.

En ningún caso las peticiones de información dirigidas al Adjudicatario por la Propiedad supondrán una injerencia de la Propiedad en la ejecución del contrato, ni entrañarán una participación de la Propiedad en la responsabilidad del Adjudicatario. Las peticiones tendrán únicamente carácter informativo.

En todo caso, el Adjudicatario es el único responsable del ejercicio de la función que le es propia, en orden a las obligaciones del contrato.

Siempre que sea requerido, el Adjudicatario, o su representante, deberá presentarse en el domicilio de la Propiedad en la obra, con el fin de que no pueda invocarse su ausencia como causa de retraso o suspensión del cumplimiento de las órdenes de la Propiedad.

La coordinación de las actividades del Adjudicatario necesarias para la ejecución del suministro con la de otros contratistas de la Propiedad o con cualquier entidad ajena al contrato con quien hay necesidad de tratar es de la competencia de la Propiedad.

Siempre que el Adjudicatario establezca contacto con otros contratistas de la Propiedad para tratar de asuntos relativos a la buena ejecución del suministro, se obliga a enviar a la Propiedad copias de las comunicaciones y correspondencia producida; las decisiones tomadas durante tales contactos sólo tendrán efecto en relación con la Propiedad si ésta las aprobase por escrito. Si como consecuencia de los anteriores contactos surgieran diferencias o dificultades, el Adjudicatario deberá pedir una reunión con los representantes de la Propiedad, que las resolverán de acuerdo con los contratos establecidos con los contratantes interesados. Las reuniones de esta naturaleza deberán ser solicitadas con un mínimo de 10 días de antelación.

La Propiedad, siempre que lo juzgue conveniente, convocará, por su iniciativa o a petición del Adjudicatario, reuniones con éste y, si es necesario, con otros contratantes, a fin de discutir y resolver, de acuerdo con el programa de trabajos aprobado, los problemas que resulten de la coordinación de los trabajos en curso, de la ocupación sucesiva de locales en la obra, de la disponibilidad de medios de utilización común y en uso.

Cuando varios contratistas y suministradores utilicen las instalaciones generales pertenecientes a uno de ellos, se pondrán de acuerdo sobre este uso suplementario y el reparto de los gastos correspondientes.

La Propiedad deberá estar permanentemente informada de los acuerdos tomados entre los distintos contratistas o suministradores para el caso de presentarse dificultades o diferencias. La decisión es obligatoria para los interesados. En ningún caso la Propiedad deberá encontrarse durante los trabajos, en presencia de una situación que tuviese lugar por una falta de información por parte del Adjudicatario o de los otros suministradores o contratistas de las obras.

Cuando varios contratistas y suministradores trabajen en la misma obra, cada uno de ellos es responsable de los daños y perjuicios de toda clase que pudieran derivarse de su propia actuación.

8.5 Subcontratación de obras

A menos que el contrato disponga lo contrario o que de su naturaleza y condiciones se deduzca que la obra ha de ser ejecutada directamente por el Adjudicatario, este último podrá contratar con terceros la realización de determinadas unidades de obra, cumpliendo para ello los siguientes requisitos:

- Notificar por escrito al Ingeniero del subcontrato a celebrar, las partes de obra a realizar y las condiciones económicas, de modo que éste las pueda autorizar previamente.
- Que las unidades de obra que el Adjudicatario contrate con terceros no excedan el 50% del presupuesto total de la obra principal.

La subcontratación deberá siempre supeditarse a la autorización por parte de la Propiedad.

En cualquier caso, la Propiedad no quedará vinculada en absoluto, ni reconocerá ninguna obligación contractual entre ella y el Subcontratista, de forma que cualquier subcontratación de obra no eximirá al Adjudicatario de ninguna de sus obligaciones respecto a la Propiedad.

8.6 Personal de montaje

Es de competencia del Adjudicatario por su cuenta y responsabilidad, todo el personal especializado, no especializado y auxiliar para la dirección y ejecución del montaje, así como todos los gastos de ese personal, tales como viajes, alojamientos, dietas, desplazamientos de alojamiento en obra y desplazamientos dentro de la propia obra.

Cualquiera que sea la nacionalidad del Adjudicatario, el reclutamiento del personal deberá cumplimentar las leyes en vigor.

Si el Adjudicatario emplea en obra personal extranjero, será de su cuenta y cargo la obtención de las condiciones necesarias para que pueda trabajar en España.

Todo el personal, independientemente de su nacionalidad, acatará las leyes laborales vigentes en cuanto a horarios, seguros sociales, etc., además de aquellas de carácter general que estén vigentes para el personal de la obra.

Al frente de cada trabajo de montaje, el Adjudicatario deberá tener, a pie de obra, un técnico titulado de cualquier especialidad o condición, que pueda acreditar de forma satisfactoria ante la Propiedad, su competencia en esta clase de trabajos.

El Adjudicatario es responsable de los fraudes o malversaciones que sean cometidas por su personal en el suministro o en el empleo de materiales.

El número de trabajadores de cada profesión deberá ser siempre proporcional a la cantidad de obra a ejecutar, teniendo en cuenta los plazos fijados.

El Adjudicatario deberá remitir a la Propiedad, siempre que lo solicite, una relación del personal presente en la obra, clasificado por categoría profesional. Está también obligado a mantener la disciplina y el orden en los lugares de trabajo.

La Propiedad se reserva el derecho a exigir la retirada de la obra de cualquier operario al servicio del Adjudicatario cuando su presencia se revele perjudicial para la marcha o el orden de los trabajos.

8.7 Seguros y asistencia médica

El adjudicatario no podrá comenzar los trabajos sin justificar previamente ante la Propiedad, tener cubiertos los seguros por accidentes de trabajo y enfermedades profesionales, de acuerdo con la legislación vigente.

El Adjudicatario asegurará por sí o por medio de una Compañía de Seguros adecuada, la prestación de asistencia médica o de enfermedad al personal.

El Adjudicatario es responsable de las condiciones de seguridad en los trabajos, estando obligado a adoptar y hacer aplicar, a su costa, las disposiciones vigentes sobre esta materia, las medidas que dicten la Inspección del Trabajo y demás organismos competentes y las normas de seguridad que correspondan a las características de las obras contratadas.

Con objeto de organizar colectivamente y de inspeccionar la seguridad y la higiene de las obras, todos los contratistas que trabajen en las mismas deberán, por indicación de la Propiedad, agruparse en el seno de una Junta Central de Seguridad, formada por los representantes de las empresas. La Junta que tendrá por misión coordinar las medidas de seguridad adoptadas por los comités u organizaciones de seguridad de cada una de las empresas.

9. CONDICIONES DE PAGO Y LEGISLACIÓN

9.1 Definición de precios

Los gastos de los bienes y servicios objeto del suministro serán expresados en moneda española y cubrirá la fabricación, el suministro y el montaje de todos los equipos ensayados y en funcionamiento, así como todos los repuestos y servicios adicionales que se especifiquen.

Los gastos de primer establecimiento, desmontaje y retirada de las instalaciones de obra estarán incluidos en el precio del suministro.

El precio de los materiales y equipos que componen el suministro comprenderá:

- Coste en factoría del Adjudicatario de los materiales y equipos, sean de procedencia nacional o extranjera, con el embalaje adecuado.
- Coste del transporte de factoría a pies de obra y distribución en la propia obra.
- Coste del seguro de transporte.
- Coste unitario de las piezas de repuesto que se establezcan.

En el precio de materiales y equipos estarán incluidos los estudios de fabricación, dibujos, esquemas eléctricos, etc., así como los derechos de patente, y demás que puedan incidir sobre los mismos, quedando la Propiedad libre de cualquier existencia de terceros sobre los citados derechos.

En el precio del transporte se incluirá cargas, descargas, transbordos, colocación en parque o almacén, incluso guarda, así como los gastos correspondientes a derechos aduaneros o permisos de importación de haberlos.

El costo de montaje incluirá los gastos de instrucción y adiestramiento del personal de la Propiedad, que se hará cargo de la explotación de las instalaciones, el precio de los seguros de montaje y los ensayos de los equipos e instalaciones, en los términos señalados en este Pliego.

9.2 Prestaciones accesorias y trabajos por administración

El Adjudicatario está obligado a realizar, a título accesorio, trabajos de pequeña importancia y prestaciones complementarias en régimen de Administración.

Los trabajos realizados en régimen de Administración se liquidarán del siguiente modo:

- a) Empleo de mano de obra y materiales: el importe a abonar por estos conceptos viene dado por la ecuación 9.1.

$$I = (J + M) \cdot \frac{(100 + n)}{100} \quad (9.1)$$

Donde:

J: importe total de la mano de obra, obtenido aplicando al total de horas trabajadas por personal obrero de cada categoría, directamente empleado en estos trabajos, la tarifa media horaria correspondiente, según baremo establecido, incluyendo jornales, cargas sociales, gastos de alojamiento y porcentaje de útiles y herramientas. El baremo citado debe figurar como anexo en el cuadro de precios.

M: precio pagado según factura de los materiales y suministros utilizados en estos trabajos, incluido el transporte hasta almacén de obra.

n: tanto por ciento de aumento sobre los conceptos anteriores, que cubre los demás gastos, gastos generales y beneficio. El valor de n se fijará en el contrato y será siempre mayor o igual que 20.

- b) Empleo del equipo auxiliar: la mano de obra directa y el combustible y energía correspondientes al empleo de maquinaria o equipo auxiliar del Adjudicatario, para la ejecución de trabajos o prestaciones de servicios pagados por la Administración, se abonará al Adjudicatario por aplicación de las fórmulas anteriores.

Además, se abonará al Adjudicatario una remuneración, según tarifa, en concepto de utilización de la maquinaria, incluyendo los gastos de conservación, reparaciones y recambios.

Se emplearán una o varias tarifas según el tipo de maquinaria, expresados siempre en un tanto por mil del valor de la máquina por hora efectiva de utilización (o bien por día natural de utilización).

Cuando se decida, de común acuerdo, traer a la obra nueva maquinaria, especialmente para trabajos por Administración, se empleará también la fórmula anterior, pero se asegurará al Adjudicatario una remuneración diaria mínima en concepto de inmovilización, expresada también en un tanto por mil del valor de la máquina por día natural de inmovilización. Además, en este caso, se abonará al Adjudicatario el transporte de la maquinaria a obra, ida y vuelta, y los gastos de montaje y desmontaje, si los hubiere, según la fórmula indicada en el apartado a).

Cuando una máquina sea utilizada con posterioridad a la fecha en que su empleo era necesario para terminar los trabajos objetos del presente contrato, a partir de la misma se asegurará al Adjudicatario la percepción del mínimo de inmovilización antes señalado.

Los importes obtenidos por la expresión anterior se expresarán también en el mismo porcentaje n citado, que cubre los demás gastos, gastos generales y beneficio.

9.3 Trabajos no previstos

Cuando se juzgue necesario ejecutar trabajos no previstos, se prepararán los precios correspondientes, teniendo en cuenta los del contrato o, por asimilación, los de obras semejantes. Los nuevos precios se basarán en las mismas condiciones económicas que los precios del contrato.

Si no hubiese conformidad en la fijación de dichos precios entre la Propiedad y el Adjudicatario, éste quedará relegado de la construcción de la parte de la obra de que se trate, sin derecho a indemnización de ninguna clase. En esta situación en la que, a juicio de la Propiedad, sea imposible el fijar nuevos precios, o así le convenga a esta última, corresponderá únicamente a ella la decisión de abonar excepcionalmente los trabajos en régimen de Administración.

Cuando se proceda al empleo de los materiales o ejecución de las obras de que se trate, sin la previa aprobación de los precios que hayan de aplicárseles, se entenderá que el Adjudicatario se conforma con los que le fije la Propiedad.

9.4 Revisión de precios

En caso de variación de las condiciones económicas en el curso de la ejecución del contrato, los precios establecidos serán revisados por aplicación de la fórmula general recogida en la ecuación 9.2.

$$P = P_0 \cdot K \quad (9.2)$$

Donde:

P₀: precio de origen a revisar.

P: nuevo valor del precio P₀ después de la revisión.

K: coeficiente de la ecuación (9.3)

$$K = 0,15 + a \cdot \frac{H_i}{H_0} + b \cdot \frac{M_i}{M_0} \quad (9.3)$$

Donde:

a y b: son coeficientes de influencia que cumplen la característica de que (a+b)=0,85.

H₀: índice de mano de obra en la fecha de presentación de la oferta.

H_i: índice de mano de obra en el periodo en el curso del cual se ha calculado la revisión.

M₀: índice de materiales en la fecha de presentación de la oferta.

M_i: índice de materiales en el periodo en el curso del cual se ha calculado la revisión.

Los índices que han de utilizarse en las fórmulas de revisión serán los índices oficiales de precios sometidos mensualmente a la aprobación del Gobierno por el Comité Superior de Precios de Contratos del Estado y publicados en el Boletín Oficial del Estado, según dispone el Decreto Ley de 4 de febrero de 1964.

Para un contrato pueden ser previstos uno o varios coeficientes *K*, aplicándose cada uno a un determinado grupo de precios.

La revisión de los precios se realizará únicamente en el caso de producirse variaciones en los índices previstos en cada caso. La Propiedad establecerá en cada caso particular la

fórmula o fórmulas de revisión a emplear y las normas complementarias de aplicación de las mismas.

Si los trabajos no han terminado al final del plazo global de ejecución previsto en el convenio serán prolongados, si ha lugar, en un tiempo igual al de los retrasos reconocidos y aceptados por la Propiedad resultantes de circunstancias que no son imputables al Adjudicatario. Los valores de los coeficientes K a utilizar en la continuación de las obras no podrán en ningún momento ser superiores a los alcanzados en la época de la terminación del plazo. Todos los valores serán, por el contrario, aplicados a partir de la época en que los mismos se hayan comprobado. En principio, no serán revisables más que los precios que se refieren a prestaciones efectuadas en territorio español.

Además, cuando estos precios contengan elementos que dependan de un sistema económico extranjero, su revisión se limitará únicamente a la fracción de cada uno de ellos que dependa de las variaciones económicas comprobadas en España. Si el contrato prevé excepcionalmente la revisión de los precios que dependan en su totalidad o en parte de un sistema económico extranjero, el importe revisado por medio de las fórmulas contractuales previstas a este efecto estará limitado al valor obtenido:

- Convirtiendo el precio inicial, cuando esté fijado en divisas extranjeras, en euros, al tipo de cambio en la fecha de referencia de precios.
- Aplicando al precio inicial, expresado en euros, la fórmula de revisión contractual, después de haber reemplazado los índices en vigor en el país extranjero por los índices o tipos de la misma naturaleza establecidos en el contrato.
- Convirtiendo en su caso el importe obtenido en divisas al cambio aplicable en las fechas de revisión.

9.5 Condiciones de pago

A efecto de pago de los diferentes equipos y servicios objeto del contrato, serán consideradas las dos partidas siguientes:

- Equipo y materiales entregados en el local de montaje.
- Montaje e instrucción del personal de explotación de la Propiedad.

En el contrato figurará una cláusula en la que se indique claramente la forma en que la Propiedad efectuará los pagos del equipo y materiales.

El coste del montaje será abonado totalmente en la fecha de recepción definitiva de las instalaciones, salvo que se especifique otro acuerdo en el contrato. En él se indicará el porcentaje sobre el coste total de los suministros y servicios prestados por el Adjudicatario, que no se abonarán hasta la terminación del plazo de garantía.

9.6 Penalizaciones

Podrán aplicarse penalizaciones al Adjudicatario, e incluso podrá determinarse la rescisión del contrato en los siguientes casos:

- Si no se respetan las fechas finales o intermedias del programa general de trabajos aprobados.
- Si retrasa la entrega de la documentación técnica.
- Si el equipo, o parte de él, no fuera capaz de asegurar normalmente el servicio industrial para el cual fue concebido y especificado.
- Si los resultados de las medidas y ensayos no correspondieran a los valores garantizados.

Aparte de las penalizaciones referidas en la cláusula del apartado anterior, el Adjudicatario tomará a su cargo los gastos ocasionados por sus retrasos.

Las penalizaciones o rescisión a que se ha hecho referencia serán aplicadas después de comprobar la Propiedad la imposibilidad, por parte del Adjudicatario, de corregir las faltas o defectos verificados y los desvíos medidos y después de haber introducido en el plazo autorizado por la Propiedad las modificaciones del equipo y sin que, entretanto, se produjeran perjuicios directos o indirectos a la Propiedad. La cuantía de la penalización será determinada y calculada en cada caso particular en función del perjuicio causado a la Propiedad.

La Propiedad notificará al Adjudicatario la aplicación de penalizaciones mediante carta certificada con acuse de recibo.

9.7 Indemnizaciones a favor del Adjudicatario

Únicamente tendrán derecho a la indemnización a favor de Adjudicatario las pérdidas, averías y daños imputables a la Propiedad y debidamente comprobadas, y eventualmente las imputables a casos de fuerza mayor.

El Adjudicatario tomará las disposiciones necesarias, a su costa y riesgo, para que su material e instalaciones no puedan sufrir daños o perjuicios como consecuencia de fenómenos naturales previsibles de acuerdo con la situación u orientación de la obra.

En caso de que el Adjudicatario estime que existen casos de fuerza mayor señalará este hecho por escrito a la Propiedad en el plazo máximo de diez días después de ocurrida la causa.

La Propiedad se reserva el derecho de fijar en cada caso las indemnizaciones que puedan concederse al Adjudicatario y decidir si el motivo por el que reclama la indemnización puede incluirse en lo reseñado anteriormente. Pasado el plazo de diez días, no se admitirá al Adjudicatario ninguna reclamación.

9.8 Cese o aplazamiento de los trabajos, rescisión del contrato

En el caso de que la Propiedad ordene el cese absoluto de los trabajos, el contrato queda inmediatamente rescindido. Si la Propiedad ordena su aplazamiento por más de un año, sea antes o después del comienzo de las obras, el Adjudicatario tiene derecho a la rescisión del contrato, si lo solicita por escrito, sin perjuicio de la indemnización que, tanto en un caso como en el otro, le corresponda, si hay lugar a ello. No se aceptará la petición de rescisión por parte del Adjudicatario cuando sea presentada en un plazo superior a los cuatro meses a partir de la fecha de notificación de la orden de servicio prescribiendo el cese o el aplazamiento de los trabajos.

Si la Propiedad ordena el aplazamiento de los trabajos por menos de un año, el Adjudicatario no tendrá derecho a la rescisión, pero sí a una indemnización en caso de perjuicios debidamente comprobados.

En el caso de que se hubiesen empezado los trabajos, el Adjudicatario puede requerir que se proceda a la recepción provisional de las obras acabadas y en estado de ser recibidas y después a la recepción definitiva, una vez cumplido el plazo de garantía.

En caso de fallecimiento del Adjudicatario, el contrato será rescindido de pleno derecho, salvo que los herederos se comprometan por escrito a cumplir el contrato existente sin introducir en él modificación alguna.

En caso de quiebra o de suspensión de pagos del Adjudicatario, el contrato queda inmediatamente rescindido de pleno derecho, bastando para ello que la Propiedad lo notifique de forma fehaciente en el plazo de dos meses a partir de la publicación legal de la declaración de quiebra o de la suspensión de pagos.

En todo momento las medidas de conservación o de seguridad cuya urgencia sea manifiesta, serán tomadas de oficio por la Propiedad con cargo al Adjudicatario, sin perjuicio de la decisión definitiva del Tribunal.

Cuando el Adjudicatario no dé cumplimiento a las disposiciones u obligaciones de contrato o a las órdenes que le sean dadas por la Propiedad, ésta la intimará a cumplir estos requisitos u órdenes en un plazo determinado que, salvo casos de urgencia, no será menor de diez días a partir de la notificación de la intimación.

Pasado este plazo, si el Adjudicatario no ha ejecutado las disposiciones prescritas, la Propiedad podrá ordenar, a título provisional, el establecimiento de un régimen de intervención general o parcial por cuenta del Adjudicatario. Se procederá inmediatamente, en presencia del Adjudicatario, o habiéndose convocado debidamente, a la comprobación de los trabajos realizados, de los materiales acopiados, así como el inventario descriptivo de su material y a la devolución a éste de la parte de los materiales que no utilizará la Propiedad para la terminación de los materiales.

Por otra parte, la Propiedad tiene, la facultad, sea de ordenar la convocatoria de un nuevo concurso, en principio sobre petición de ofertas, por cuenta y riesgo del Adjudicatario rebelde, sea de ejecutar el derecho de rescisión pura y simple del contrato, sea de prescribir la continuación de la intervención.

Durante el período del régimen de intervención, el Adjudicatario podrá conocer la marcha de los trabajos sin que pueda, de ninguna manera, entorpecer o dificultar las órdenes de la Propiedad. El Adjudicatario podrá, por otra parte, ser liberado del régimen de intervención si justifica su capacidad para volver a hacerse cargo de los trabajos y llevarlos a buen fin. Los excedentes de gastos que resulten de la intervención o del nuevo contrato serán deducidos de las sumas que puedan ser debidas al Adjudicatario, sin perjuicio de los derechos a ejercer contra él en caso de ser insuficientes. Si la intervención o el nuevo contrato suponen, por el contrario, una disminución de gastos, el Adjudicatario no podrá pretender beneficiarse en ninguna parte de la diferencia que quedará a favor de la Propiedad.

En todos los casos de rescisión se procederá con el Adjudicatario a la comprobación de los trabajos realizados, al inventario de los materiales acopiados, así como al inventario descriptivo de la maquinaria y de la instalación de la obra.

En caso de rescisión por otros conceptos que no sean la petición de ésta por parte de la Propiedad, esta última entidad puede exigir al Adjudicatario que mantenga en la obra todo o parte de sus instalaciones generales o de su material, con el fin de poder disponer libremente la prosecución de los trabajos, encargando su explotación, si lo estima conveniente, a otra

empresa. De este modo, las instalaciones, maquinaria, etc., que la Propiedad decida que deben permanecer en obra, podrán ser utilizadas tanto por la Propiedad, como por otra empresa de su elección, hasta la fecha de terminación de las obras objeto del contrato rescindido, sin pago alguno por parte de la Propiedad o de la empresa que designe, en concepto de alquiler, amortización, etc.

En os casos de rescisión por decisión de la Propiedad, se decidirá de mutuo acuerdo entre ésta y el Adjudicatario, las instalaciones que deben permanecer en la obra y la indemnización a pagar por la Propiedad en ese concepto.

En ningún caso podrá el Adjudicatario retirar de la obra maquinaria, materiales, instalaciones, etc., sin la autorización escrita de la Propiedad. En caso de rescisión del contrato, la Propiedad le comunicará en un plazo de cuatro meses a partir de la fecha de rescisión, las instalaciones, maquinaria, materiales, etc., que deben permanecer en la obra. También le indicará el plazo en que debe retirar de la obra las instalaciones, maquinaria, materiales, etc., que la Propiedad no vaya a emplear en la terminación de las mismas.

9.9 Legislación

Las leyes españolas regularán las fases de concurso y el establecimiento del contrato.

El Adjudicatario queda obligado a respetar las disposiciones prescritas en la legislación española vigente aplicables a la ejecución del contrato y a soportar las consecuencias de su incumplimiento.

El Adjudicatario y la Propiedad acuerdan la resolución de todas las divergencias, controversias o discrepancias a que puedan dar lugar la interpretación o la ejecución del contrato de obras al juicio arbitral de derecho privado, de acuerdo con las normas establecidas en la Ley de 22 de diciembre de 1983.

Los árbitros resolverán sobre los puntos concretos que se sometan a su decisión en la correspondiente escritura notarial de formalización de compromiso y dentro del plazo que en la misma se señale.

Los honorarios de los árbitros serán sufragados a media entre el Adjudicatario y la Propiedad.

Contra el laudo emitido por los árbitros, con arreglo a su leal saber y entender, únicamente cabrá recurso de nulidad ante la Sala del Tribunal Supremo, por los motivos que se indican en la Ley 1/2000, de 7 de enero, de Enjuiciamiento Civil.

Planta de Producción de Hidrógeno por
Reformado de Gas Natural

DOCUMENTO V.

PRESUPUESTO

Trabajo de Fin de Grado en Ingeniería Química

Universidade de Santiago de Compostela

Escola Técnica Superior de Enxeñaría

Julio 2016

Alejandro Ferraces Azcunaga | Óscar López Gestoso

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. COSTES DIRECTOS	7
2.1 Equipos	7
2.1.1 Intercambiadores de calor	7
2.1.2 Reactores HTS y LTS.....	9
2.1.3 Reactor reformador.....	10
2.1.4 Columnas de absorción y desorción	10
2.1.5 Columnas de adsorción.....	11
2.1.6 Compresores	12
2.1.7 Bombas	12
2.1.8 Separadores de condensados	13
2.1.9 Costes de los equipos.....	13
2.2 Instalación de equipos.....	15
2.3 Instrumentación y control	15
2.4 Tuberías	16
2.5 Instalación eléctrica	16
2.6 Edificios	16
2.7 Terreno.....	17
2.8 Acondicionamiento del terreno	17
2.9 Sistema de utilidades	17
2.10 Costes directos totales.....	18
3. COSTES INDIRECTOS	18
3.1 Ingeniería y supervisión.....	18

3.2 Gastos de construcción	19
3.3 Gastos legales	19
3.4 Cuota del contratista	20
3.5 Contingencias	20
3.6 Costes indirectos totales.....	20
4. COSTES FIJOS TOTALES O CAPITAL INMOVILIZADO	21
5. CAPITAL CIRCULANTE.....	21
6. PRESUPUESTO TOTAL	22
7. BIBLIOGRAFÍA	23

1. INTRODUCCIÓN

A continuación se procede a detallar el presupuesto de obra e implantación de la presente planta de reformado con vapor de agua de gas natural.

El nivel de detalle de dicho análisis es reducido debido a que el objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado no es diseñar todas las unidades, si no centrarse en las más importantes y así poder realizar un estudio más riguroso de las mismas. Por ello, resulta imposible precisar el precio de ciertos equipos por falta de información, con lo que se procederá a una estimación de sus capacidades para poder definir un coste aproximado. Estas capacidades sólo tienen validez dentro de este análisis de presupuesto por tal motivo y no se incluyen en la descripción de las mismas.

El presupuesto para la construcción de la presente planta de reformado incluye los costes fijos, los cuales a su vez pueden ser directos e indirectos, y el capital circulante. [1]

Los costes fijos son: [1]

- Costes directos:
 - Equipos comprados
 - Instalación de equipos comprados
 - Instrumentación y control
 - Tuberías
 - Instalación eléctrica
 - Edificios
 - Acondicionamiento del terreno
 - Sistema de utilidades
 - Terreno
- Costes indirectos:
 - Ingeniería y supervisión
 - Gastos legales
 - Gastos de construcción
 - Cuota del contratista
 - Contingencias

Por otro lado, el capital circulante está formado por el dinero total invertido en: [1]

- Materias primas y suministro en stock para la puesta en marcha
- Producto final en stock
- Cuentas a pagar

- Tasas a pagar
- Liquidez para pagar los gastos mensuales de operación (salarios, compra de materia prima)
- Cuentas a cobrar

La estimación de las partidas anteriores se puede determinar a partir del valor de los equipos mecánicos instalados. A su vez, existen varios métodos para calcular estos costes, los cuales se basan en parámetros característicos como su capacidad o su tamaño. El método elegido se basa en el empleo gráficas publicadas en la bibliografía con los costes de equipos en enero de 2002, las cuales tienen en cuenta las condiciones de operación y el material. [1]

Debido a que los precios varían a lo largo de los años y el método propuesto sólo es válido para un determinado momento, es necesario actualizarlos, lo cual se puede hacer empleando los índices de coste. Este procedimiento consiste en asociar un índice a cada año de tal forma que a partir de ellos se pueda estimar de forma rápida el precio actual, mediante la ecuación 1.1. [1]

$$Coste\ actual = Coste\ anterior \cdot \left(\frac{índice\ actual}{índice\ anterior} \right) \quad (1.1)$$

Una vez estimados los costes de los equipos, se procede al cálculo del resto de ítems pertenecientes a los costes fijos. En el presente documento se emplea el método basado en porcentajes. Esta mecánica emplea como base los costes de equipos entregados y asigna un porcentaje de los mismos a cada partida. En la Tabla 1 se recogen dichos porcentajes. [1]

Tabla 1. Factores para la estimación de la inversión de capital basados en el coste de equipos entregados. Fuente: [1]

	Porcentaje de costes de equipo entregado (manejo de fluidos)
Costes directos	
Equipos entregados	100
Instalación de equipos	47
Instrumentación y control (instalado)	36
Tuberías (instalado)	68
Instalación eléctrica (instalado)	11
Edificios (incluyendo servicios)	18
Acondicionamiento del terreno	10
Sistema de utilidades (instalado)	70
Total costes directos	360
Costes indirectos	
Ingeniería y supervisión	33
Gastos de construcción	41
Gastos legales	4
Cuota del contratista	22
Contingencias	44
Total costes indirectos	144
Costes fijos	504
Capital circulante	89
Coste total	593

El coste total puede determinarse a partir de la ecuación 1.2: [1]

$$Coste\ total = E \cdot \sum (1 + f_1 + f_2 + \dots + f_n) \quad (1.2)$$

Donde E es el coste de los equipos entregados y f_i son los factores recogidos en la Tabla

1.

A continuación se procede al cálculo de los costes en enero de 2002 para cada partida.

2. COSTES DIRECTOS

2.1 Equipos

Para actualizar los costes se emplean los índices propuestos por la revista *Chemical Engineering*. Se ha utilizado la metodología de cálculo del libro *Plant design and economics for chemical engineers* de los autores Peters y Timmerhaus que emplea datos de enero de 2002 con un índice de actualización de precios CEPCI de 390,4. El índice para principios del año 2016 presenta un valor de 556,8. [1] [2]

A continuación se procede a la estimación de la capacidad de las unidades para poder estimar su coste. Se consideran todos los equipos de acero inoxidable debido al carácter corrosivo de los fluidos presentes en la mayor parte del proceso.

2.1.1 Intercambiadores de calor

El coste asociado a los intercambiadores se puede estimar a partir de su área de intercambio. [1]

Por ello, partiendo del calor intercambiado, se procede a definir unos coeficientes de transmisión de calor (U) típicos para los fluidos que intercambian calor y las temperaturas medias logarítmicas (ΔT_{mlog}). En consecuencia, se pueden estimar las áreas de intercambio necesarias y con ellas, el coste de dichos equipos.

En la Tabla 2 se listan los valores asociados a la determinación de las áreas aproximadas de los intercambiadores de la presente planta.

Tabla 2. Estimación de las áreas de intercambio para los intercambiadores de calor

Intercambiador	Fluidos (caliente/frío)	Q (kW)	U* (W/m ² K)	ΔT_{mlog} (°C)	Área (m ²)
E-101	disol. ac./disol. ac.	43,94	1500	4,9	5,98
E-102	vapor/disol. ac.	7,419	1700	4,0	1,09
E-103	disol. ac./agua	16,05	1500	21,5	0,50
E-104	vapor/agua	4,089	1700	30	0,08
E-202	gas/agua	15469	200	300	257,8
E-203	gas/agua	7883	200	292,8	134,6
E-301	gas/agua	11722	500	67,5	347,4
E-302	gas/agua	480	500	21,5	44,65
E-303 A/B	disol. ac./disol. ac.	63167	1500	13,2	3190
E-304	vapor/disol. ac.	28722	1700	63	266,6
E-305	disol. ac./agua	30167	1500	25,7	783,8
E-306	vapor/agua	2270	1700	40,3	33,2

* Dato según *Plant design and economics for chemical engineers* [1]

En consecuencia, los costes asociados a cada equipo se recogen en la Tabla 3.

Tabla 3. Coste de adquisición de los intercambiadores de la planta en enero de 2002

Intercambiador	Importe (\$)
E-101	$3,50 \cdot 10^3$
E-102	$2,00 \cdot 10^3$
E-103	$2,00 \cdot 10^3$
E-104	$2,00 \cdot 10^3$
E-202	$3,90 \cdot 10^4$
E-203	$2,00 \cdot 10^4$
E-301	$5,00 \cdot 10^4$
E-302	$1,00 \cdot 10^4$
E-303 A/B	$2 \times 2,00 \cdot 10^5$
E-304	$4,00 \cdot 10^4$
E-305	$1,50 \cdot 10^5$
E-306	$8,50 \cdot 10^5$

Debido a la poca exactitud de la estimación de las áreas de intercambio de calor, existen dos intercambiadores cuyo coste es difícil de precisar. En el caso del intercambiador E-303 presenta un área demasiado grande, por ello se considera que es un tren de dos intercambiadores

iguales. Por otro lado, los intercambiador E-103 y E-104 son demasiado pequeños y, por ello, se aproxima su coste al equipo de menor tamaño admisible.

2.1.2 Reactores HTS y LTS

El coste de cualquier recipiente a presión puede ser obtenido a partir de sus dimensiones y de las condiciones de operación. Además de ello, se contabiliza el precio del relleno, incluyendo soportes y distribuidores, lo cual se puede determinar a partir de las dimensiones del equipo y del tipo de material. El precio del catalizador se estima en 3 dólares americanos por kg. [1]

Para estimar el tamaño de dichos equipos se parte de un valor intermedio de las velocidades espaciales (SV) típicas de entre 300 y 4000 l/h l_{cat} . [3]

Se elige un valor de 2000 l/h l_{cat} para ambos reactores. A partir de sus caudales se determina sus volúmenes con la ecuación 2.1: [3]

$$SV = \frac{\text{Caudal gas de síntesis seco (l/h)}}{\text{Volumen catalizador (l}_{cat})} \quad (2.1)$$

Se asume que son reactores cilíndricos con una relación de longitud diámetro L/D de 3. En consecuencia, los valores obtenidos se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4. Estimación de las dimensiones de los reactores R-202 y R-203

Reactor	SV (l/h l_{cat})	Flujo gas seco (kmol/h)	Volumen (m ³)	Masa cat. (kg)	L (m)	D (m)
R-202	2000	2121,7	23,7	86000	6,48	2,16
R-203	2000	2326,6	26,0	94000	6,68	2,22

En la Tabla 5 se recogen el precio de cada reactor.

Tabla 5. Coste de adquisición de R-202 y R-203 de la planta en enero de 2002

Reactor	Importe (\$)
R-202	4,20·10 ⁵
R-203	4,72·10 ⁵

2.1.3 Reactor reformador

Para determinar el precio del reformador se calcula en base a la generación de energía y presión de operación, debido a su similitud con un horno. Se sobredimensiona en un 50 % para contabilizar el sobre coste debido a la necesidad de una aleación especial para los tubos (*AISI A 608 Grade HK40*) y el catalizador. [1]

En la Tabla 6 se recogen los parámetros necesarios para dicho cálculo y el coste obtenido.

Tabla 6. Características del reformador R-203 y estimación de su coste en enero de 2002

Reactor	Potencia (MW)	Presión (MPa)	Masa cat. (kg)	Importe (\$)
R-201	60	1,9	5400	$6,30 \cdot 10^6$

2.1.4 Columnas de absorción y desorción

Las dimensiones de la columna C-201 son definidas en su diseño correspondiente, pero las demás unidades no presentan dimensiones conocidas. Por ello, a partir de las condiciones de operación y de la información recopilada en la bibliografía, se estima su tamaño de forma aproximada.

En la Tabla 7 se recogen las dimensiones de cada columna.

Tabla 7. Estimaciones de las dimensiones de las columnas de absorción y desorción de la planta

Columna	L (m)	D (m)
C-101	11,6	0,9
C-102	9,6	1,2
C-301	29,08	3,03
C-302	22,4	3,8

Para la estimación de los costes de compra de las columnas se procede un procedimiento similar al de los reactores R-202 y R-203, donde el gasto de los equipos se determina a partir de las dimensiones, las condiciones de operación y el relleno. [1]

Los resultados obtenidos se listan en la Tabla 8.

Tabla 8. Coste de adquisición de las columnas de absorción y de desorción de la planta en enero de 2002

Columna	Importe (\$)
C-101	$1,53 \cdot 10^5$
C-102	$8,20 \cdot 10^4$
C-201	$9,60 \cdot 10^5$
C-202	$5,10 \cdot 10^5$

2.1.5 Columnas de adsorción

De nuevo, el tamaño de estos equipos no ha sido definido, por ello se procede a su estimación a partir de datos bibliográficos proporcionando los resultados recogidos en la Tabla 9. Según la bibliografía, el adsorbente necesario se estima en $8 \cdot 10^3$ lb por tonelada diaria de H_2 [4] y la densidad del lecho es de 500 kg/m^3 [1]. El precio del carbón activo se estima en 8 dólares americanos por kg. [5]

Todos los lechos presentan el mismo volumen y se elige una relación longitud diámetro L/D de 3.

Tabla 9. Estimación de las dimensiones de las columnas de adsorción

Columna	H_2 producido total (kg/h)	Masa adsorbente total (kg)	Volumen (m^3)	L (m)	D (m)
C-303	3444,2	$7,5 \cdot 10^3$	150	12,0	4,0
C-304			150	12,0	4,0
C-305			150	12,0	4,0
C-306			150	12,0	4,0

Aplicando el mismo método que para los demás recipientes a presión empacados, los costes obtenidos se listan en la Tabla 10.

Tabla 10. Coste de adquisición de las columnas de adsorción de la planta en enero de 2002

Columna	Importe (\$)
C-303	$9,51 \cdot 10^5$
C-304	$9,51 \cdot 10^5$
C-305	$9,51 \cdot 10^5$
C-306	$9,51 \cdot 10^5$

2.1.6 Compresores

La capacidad de los compresores se recoge en la Tabla 11.

Tabla 11. Características de los compresores de la planta

Compresor	Tipo	Presión (MPa)	Caudal (m ³ /s)	Potencia (kW)
		Entrada-salida		
K-202	Recíproco	0,35-1,3	0,0526	1,5
K-201	Centrífugo	1,3-1,9	0,257	201
K-301	Centrífugo	1,6-2,03	0,984	626

A partir del tipo, de la potencia y las condiciones de funcionamiento se puede estimar sus costes, los cuales se recogen en la Tabla 12. [1]

Tabla 12. Coste de adquisición de los compresores de la planta en enero de 2002

Compresor	Importe (\$)
K-202	$5,50 \cdot 10^4$
K-201	$3,25 \cdot 10^4$
K-301	$8,75 \cdot 10^4$

2.1.7 Bombas

Las características de las bombas se listan en la Tabla 13.

Tabla 13. Características de las bombas de la planta

Bomba	Tipo	Presión (MPa)	Caudal (m ³ /s)	Potencia (kW)
		Entrada-salida		
P-101 A/B	Centrífuga	0,16-2,03	$1,38 \cdot 10^{-4}$	0,251
P-301 A/B	Centrífuga	0,16-2,03	208,83	567,8

Para el cálculo de los costes de compra de las bombas se parte de las condiciones de operación, y los precios obtenidos se listan en la Tabla 14. [1]

Tabla 14. Coste de adquisición de las bombas de la planta en enero de 2002

Bomba	Importe (\$)
P-101 A/B	$3,84 \cdot 10^3$
P-301 A/B	$5,76 \cdot 10^5$

2.1.8 Separadores de condensados

Para determinar el coste de estos recipientes a presión es necesario estimar previamente su tamaño, debido a que dicho cálculo se fundamenta en sus dimensiones y condiciones de operación. [1]

Los valores típicos de tiempos de retención para estos equipos se pueden encontrar entre 5 y 10 minutos, habitualmente, con lo que se elige el valor medio de 7 minutos.

En consecuencia, a partir de los caudales alimentados a dichos equipos se estiman sus dimensiones, para una relación de L/D de 3, proporcionando los valores recogidos en la Tabla 15.

Tabla 15. Estimación de las dimensiones de los separadores de condensados

Separador	Caudal alimentado (m³/h)	Volumen (m³)	L (m)	D (m)
S-101	1,77	0,207	1,3	0,4
S-301	3841	448,2	17,3	5,8
S-302	567,4	66,20	9,1	3,0

Los costes de compra de los separadores de condensados se recogen en la Tabla 16.

Tabla 16. Coste de adquisición de los separadores de condensados de la planta en enero de 2002

Separador	Importe (\$)
S-101	$1,62 \cdot 10^4$
S-301	$5,40 \cdot 10^5$
S-302	$3,24 \cdot 10^5$

2.1.9 Costes de los equipos

En la Tabla 17 se recogen los precios de los equipos actualizados a enero de 2016 y el importe total.

Tabla 17. Costes actualizados de equipos a enero de 2016 e importe total de equipos

Equipo	Descripción	Unidades	Coste unidad (enero 2016) (\$/u.)	Importe (\$)
C-101	Columna de absorción	1	$2,18 \cdot 10^5$	$2,18 \cdot 10^5$
E-101	Intercambiador de calor	1	$4,99 \cdot 10^3$	$4,99 \cdot 10^3$
C-102	Columna de desorción	1	$1,17 \cdot 10^5$	$1,17 \cdot 10^5$
E-102	Intercambiador de calor	1	$2,85 \cdot 10^3$	$2,85 \cdot 10^3$
P-101 A/B	Bomba centrífuga	2	$5,48 \cdot 10^3$	$1,10 \cdot 10^4$
E-103	Intercambiador de calor	1	$2,85 \cdot 10^3$	$2,85 \cdot 10^3$
E-104	Intercambiador de calor	1	$2,85 \cdot 10^3$	$2,85 \cdot 10^3$
S-101	Separador de condensados	1	$2,31 \cdot 10^4$	$2,31 \cdot 10^4$
K-201	Compresor centrífugo	1	$4,64 \cdot 10^4$	$4,64 \cdot 10^4$
R-201	Reformador	1	$8,99 \cdot 10^6$	$8,99 \cdot 10^6$
E-202	Intercambiador de calor	1	$5,56 \cdot 10^4$	$5,56 \cdot 10^4$
R-202	Reactor HTS	1	$5,99 \cdot 10^5$	$5,99 \cdot 10^5$
E-203	Intercambiador de calor	1	$2,85 \cdot 10^4$	$2,85 \cdot 10^4$
R-203	Reactor LTS	1	$6,73 \cdot 10^5$	$6,73 \cdot 10^5$
K-202	Compresor recíproco	1	$7,84 \cdot 10^4$	$7,84 \cdot 10^4$
E-301	Intercambiador de calor	1	$7,13 \cdot 10^4$	$7,13 \cdot 10^4$
S-301	Separador de condensados	1	$7,70 \cdot 10^5$	$7,70 \cdot 10^5$
K-301	Compresor centrífugo	1	$1,26 \cdot 10^6$	$1,26 \cdot 10^6$
E-302	Intercambiador de calor	1	$1,43 \cdot 10^4$	$1,43 \cdot 10^4$
C-301	Columna de absorción	1	$1,37 \cdot 10^6$	$1,37 \cdot 10^6$
E-303 A/B	Intercambiador de calor	2	$2,85 \cdot 10^5$	$5,70 \cdot 10^5$
C-302	Columna de desorción	1	$7,27 \cdot 10^5$	$7,27 \cdot 10^5$
E-304	Intercambiador de calor	1	$5,70 \cdot 10^4$	$5,70 \cdot 10^4$
P-301 A/B	Bomba centrífuga	2	$8,22 \cdot 10^5$	$1,64 \cdot 10^6$
E-305	Intercambiador de calor	1	$2,14 \cdot 10^5$	$2,14 \cdot 10^5$
E-306	Intercambiador de calor	1	$1,21 \cdot 10^5$	$1,21 \cdot 10^4$
S-302	Separador de condensados	1	$4,62 \cdot 10^5$	$4,62 \cdot 10^5$
C-304	Columna de adsorción	1	$1,36 \cdot 10^6$	$1,36 \cdot 10^6$
C-305	Columna de adsorción	1	$1,36 \cdot 10^6$	$1,36 \cdot 10^6$
C-306	Columna de adsorción	1	$1,36 \cdot 10^6$	$1,36 \cdot 10^6$
C-307	Columna de adsorción	1	$1,36 \cdot 10^6$	$1,36 \cdot 10^6$
Total				\$ 23.451.140,00
				20.632.312,97 €

Aplicando el cambio de dólar americano a euro en Junio de 2016 que se sitúa en 0,8798 €/\$, el coste de equipos asciende a 20.632.312,97 euros.

2.2 Instalación de equipos

La instalación de los equipos supone unos costes de mano de obra, cimentación, plataformas, construcción y otros factores relacionados directamente. Se asume que se corresponde al 47 % de los costes de equipo comprado para una planta que opera con fluidos. [1]

En la Tabla 18 se recogen los costes de instalación de equipos.

Tabla 18. Coste de instalación de equipos en enero de 2016

Instalación de equipos	Importe (€)
Incluye:	
Instalación de equipos	9.697.187,10
Soportes estructurales	
Equipo de aislamiento y pintura	

2.3 Instrumentación y control

La inversión de capital asociada al sistema de instrumentación y control se basa en la adquisición de los mismos, mano de obra de instalación y equipo auxiliar, entre otros. Se estima en un 36 % del coste de equipos comprados. [1]

En la Tabla 19 se listan los costes de instrumentación y control.

Tabla 19. Coste de instrumentación y control en enero de 2016

Instrumentación y control	Importe (€)
Incluye:	
Compra	
Instalación	7.427.632,67
Calibración	
Control por ordenador	
Software	

2.4 Tuberías

El coste de tubería incluye tanto la mano de obra de instalación, válvulas, soportes y otros elementos necesarios para la completa colocación de todas las tuberías de proceso. Se estima en un 68 % del precio de los equipos. [1]

En la Tabla 20 se recogen los costes de tuberías y demás accesorios.

Tabla 20. Coste de tuberías en enero de 2016

Tuberías	Importe (€)
Incluye:	
Tuberías de proceso	
Materiales estructurales	14.029.972,82
Válvulas	
Aislamiento	

2.5 Instalación eléctrica

La mayor parte de los sistemas eléctricos están formados por cableado, alumbrado, transformación y servicio, y el coste de su instalación y compra es un 11 % del de los equipos. [1]

En la Tabla 21 se recogen los costes asociados a la instalación eléctrica.

Tabla 21. Coste de la instalación eléctrica en enero de 2016

Instalación eléctrica	Importe (€)
Incluye:	
Equipo eléctrico (interruptores, motores, paneles, etc.)	2.269.554,43
Materiales eléctricos	

2.6 Edificios

A continuación se detallan los costes de construcción de edificios, incluyendo servicios, mano de obra, materiales y otros para la completa construcción de los mismos. Esta partida se estima en un 18 % del coste de equipos. [1]

En la Tabla 22 se recogen los costes de construcción de edificios.

Tabla 22. Coste de edificios en enero de 2016

Edificios	Importe (€)
Incluye:	
Edificios de proceso (plataformas, estructuras, escaleras, etc.)	
Edificios auxiliares (oficinas, enfermería, almacenes, estación de bomberos, laboratorios, etc.)	3.713.816,33
Talleres de mantenimiento (eléctricos, tuberías, etc.)	
Edificios de utilidades	

2.7 Terreno

El coste del terreno se corresponde a la compra de la parcela seleccionada en el polígono industrial de A Sionlla. Su precio se recoge en la Tabla 23. [6]

Tabla 23. Coste y características de la parcela seleccionada en A Sionlla. Fuente: [6]

Parcela	Área (m²)	Precio por m² (€/m²)	Importe (€)
D4b01a	44.932	80,50	3.617.026,00

2.8 Acondicionamiento del terreno

El precio asociado al acondicionamiento del terreno se recoge en la Tabla 24, ítem que tiene en cuenta la construcción de carreteras y accesos y la limpieza del mismo, principalmente. Se corresponde a un 10 % del precio de los equipos. [1]

Tabla 24. Coste de acondicionamiento del terreno en enero de 2016

Acondicionamiento del terreno	Importe (€)
Incluye:	
Limpieza del terreno	
Accesos	
Carreteras	2.063.231,30
Áreas de parking	
Etc.	

2.9 Sistema de utilidades

En esta partida se contabiliza la producción y distribución de las utilidades de la planta como agua de refrigeración, vapor, etc. A demás de ello se tienen en cuenta otros servicios

como protección contra incendios, tratamiento de aguas y torres de enfriamiento, entre muchos otros. Se considera que su coste representa un 70 % de los costes de equipos. [1]

Los costes asociados al sistema de utilidades se listan en la Tabla 25.

Tabla 25. Coste del sistema de utilidades en enero de 2016

Sistema de utilidades	Importe (€)
Incluye:	
Utilidades (agua, vapor, energía, refrigeración, etc.)	
Instalaciones de tratamiento de aguas, torres de enfriamiento, controles ambientales, almacenamiento de combustible, etc.	14.442.619,08
Equipo de otras instalaciones (material de oficina, material médico, etc.)	

2.10 Costes directos totales

La suma de todas las anteriores partidas referidas a los costes directos, lo cual se corresponde a un 360 % de la inversión de equipos comprados más la compra del terreno, se recoge en la Tabla 26. [1]

Tabla 26. Costes directos de la presente planta de producción de hidrógeno

Costes directos totales	Importe (€)
Costes directos	77.893.123,71

3. COSTES INDIRECTOS

3.1 Ingeniería y supervisión

Los costes relacionados con ingeniería y supervisión son aquellos derivados del diseño de la planta, incluyendo licencias de software necesarias, comunicaciones y trabajo de oficina, entre otros. Se asume que se estos gastos ascienden a un 33 % de los costes de equipos. [1]

En la Tabla 27 se recoge importe debido a la partida de ingeniería y supervisión.

Tabla 27. Coste de ingeniería y supervisión en enero de 2016

Ingeniería y supervisión	Importe (€)
Incluye:	
Costes de ingeniería (administración, diseño de proceso, consultoras, etc.)	6.808.663,28
Supervisión e inspección	

3.2 Gastos de construcción

Otro gasto indirecto son los debidos a la construcción de la planta, que incluye la creación de instalaciones temporales, barracones para trabajadores, etc. Esta partida supone un gasto equivalente al 41 % de la compra de los equipos. [1]

Los gastos de construcción se recogen en la Tabla 28.

Tabla 28. Gastos de construcción en enero de 2016

Gastos de construcción	Importe (€)
Incluye:	
Construcción de instalaciones temporales	
Construcción de equipo	
Supervisión de la construcción	8.459.248,32
Tasas, intereses	
Permisos, licencias	
Seguridad y medicina	

3.3 Gastos legales

Esta partida se debe a los gastos debidos a la negociación de la adquisición de los bienes y entendimiento y aplicación de la normativa vigente, entre otros. Su coste se estima en un 4 % de los costes de equipos. [1]

A continuación, se muestra en la Tabla 29 los gastos legales.

Tabla 29. Gastos legales en enero de 2016

Gastos legales	Importe (€)
Incluye:	
Identificación de la legislación aplicable	
Preparación de formularios	825.292,52
Adquisición de aprobación regulatoria	
Negociación en contratos	

3.4 Cuota del contratista

La cuota del contratista se corresponde a un 22 % de los costes asociados a los equipos y se recoge en la Tabla 30. [1]

Tabla 30. Cuota del contratista en enero de 2016

Cuota del contratista	Importe (€)
Incluye:	
Cuota del contratista	4.539.108,85

3.5 Contingencias

Las contingencias tienen en cuenta posibles sobrecostes debidos a problemas inesperados durante la ejecución del proyecto. Estos pueden ser derivados de errores, accidentes, problemas climatológicos, etc. Se asume que se corresponden al 44 % del coste de los equipos. [1]

En la Tabla 31 se muestra el coste asociado a las contingencias.

Tabla 31. Costes de contingencias en enero de 2016

Contingencias	Importe (€)
Incluye:	
Contingencias	9.078.217,71

3.6 Costes indirectos totales

La suma de todas las anteriores partidas de costes indirectos asciende a un 144 % de la inversión de equipos comprados, resultado mostrado en la Tabla 32. [1]

Tabla 32. Costes indirectos de la presente planta de producción de hidrógeno

Costes indirectos totales	Importe (€)
Costes indirectos	29.710.530,68

4. COSTES FIJOS TOTALES O CAPITAL INMOVILIZADO

Los costes fijos de la construcción de la presente planta son la suma de los directos e indirectos antes estimados. El valor obtenido se recoge en la Tabla 33 y se asume que es un 504 % del coste de los equipos. [1]

Tabla 33. Costes fijos de la presente planta de producción de hidrógeno

Costes fijos	Importe (€)
Costes fijos	107.603.654,38

5. CAPITAL CIRCULANTE

El capital circulante está formado por el dinero y recursos como materias primas almacenadas, producto final en stock y tasas y cuentas a pagar o a cobrar, entre otros. Se estima que esta partida supone un 89 % de los costes asociados a los equipos. [1]

En la Tabla 34 se recoge el capital circulante.

Tabla 34. Capital circulante de la presente planta de producción de hidrógeno

Capital circulante	Importe (€)
Capital circulante	18.362.758,55

6. PRESUPUESTO TOTAL

La suma de los costes fijos y del capital circulante es la inversión total de la planta, cantidad que asciende a un 593 % de los costes de equipos. [1]

A continuación, en la Tabla 35 se recoge el coste total.

Tabla 35. Coste total de la presente planta de producción de hidrógeno

Coste total	Importe (€)
Coste total	125.966.412,93

El presupuesto total de la *Planta de producción de hidrógeno por reformado de gas natural* asciende a la cantidad de **CIENTO VEINTICINCO MILLONES NOVECIENTOS SESENTA Y SEIS MIL CUATROCIENTOS DOCE CON NOVENTA Y TRES EUROS.**

Santiago de Compostela, Julio de 2016

Los autores del proyecto,

Alejandro Ferraces Azcunaga

Óscar López Gestoso

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] PETERS, M. S., TIMMERHAUS, K. D., WEST, R. E. *Plant design and economics for chemical engineers*. 5ª edición, Nueva York (EE. UU.): McGraw-Hill, 2004. ISBN 978-0-07-124044-4
- [2] JENKINS, S. *Current economic trends - March 2016* [sitio web]. Chemical engineering [consultado el 15 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.chemengonline.com/current-economic-trends-march-2016/?printmode=1>
- [3] ERTL, G., KNOZINGER, H., WEITKAMP, J. *Handbook of Heterogeneous Catalysis*, Volumen 4. 1ª edición, Weinheim (Alemania): Wiley-VCH, 1997. ISBN 3-527-29212-8
- [4] SAFDAR ALLIE BAKSH, M., ACKLEY, M. W. *Pressure swing adsorption process for the production of hydrogen*. Inventores: SAFDAR ALLIE BAKSH, M. et al. United States patent application number: 6,340,382. Publicada el 22 de enero de 2002.
- [5] HOTEK CARBON MOLECULAR SIEVE CO., *PSA Carbon* [sitio web]. Made-in-China.com [consultado el 16 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.made-in-china.com/showroom/chinanorthen/product-detailvSPQChqAZVkr/China-Psa-Carbon.html>
- [6] XESTIÓN DO SOLO DE GALICIA, XESTUR. *Plano interactivo do parque: P.E. 223-A Sionlla* [sitio web] [consultado el 5 de mayo de 2016]. Disponible en: http://www.xesturgalicia.com/index.php?seccion=solo_empresarial&opcion=fichape&id=223